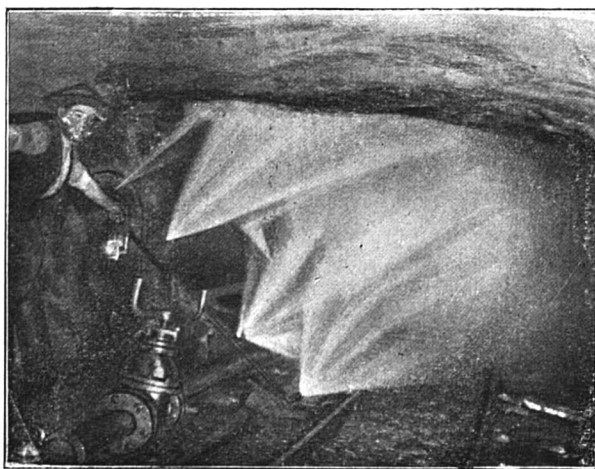


2583

LA
VENTILATION ET LA RÉFRIGÉRATION
DU
TUNNEL DU SIMPLON

PAR
E. MERMIER
Ingénieur des Chemins de fer fédéraux,
ancien Ingénieur au tunnel du Simplon.



Extrait du *Bulletin technique de la Suisse romande*, Année 1907, Nos 7, 9, 10 et 12.



Administration :

LIBRAIRIE F. ROUGE & C^{ie}, LAUSANNE

1907

PB 77

===== LAUSANNE =====

IMPRIMERIE H. VALLOTTON & TOSO

===== 2, rue de la Louve, 2 =====

LA

VENTILATION ET LA RÉFRIGÉRATION DU TUNNEL DU SIMPLON

Par E. MERMIER, Ingénieur des Chemins de fer fédéraux,
ancien Ingénieur au tunnel du Simplon.



Le 1^{er} juin 1906, les Chemins de fer fédéraux ouvrirent à l'exploitation la ligne de Brigue à Domodossola. Ce fut un grand événement pour la Suisse romande, car la ligne nouvelle reliait enfin par rails les deux tronçons de la voie internationale Paris-Lausanne-Milan, que la barrière des Alpes avait séparés jusqu'alors.

Pour franchir cet obstacle, on perça sous le massif du Simplon, entre Brigue et Iselle, un tunnel de base, qui se distingue des ouvrages similaires par son extrême longueur, la forte épaisseur de terrain qui le surmonte et la haute température des roches qu'il traverse.

Le tunnel du Simplon mesure en effet 19 804 m. et traverse des couches situées à 2135 m. au-dessous de la surface du sol. La température du rocher rencontré a dépassé 54° C. pendant l'exécution des travaux.

Malgré cette température extraordinairement élevée et quoique les ingénieurs aient été aux prises, en outre, avec des irrptions d'eaux chaudes et froides dont le volume, réuni presque en entier sur un seul versant, s'est chiffré par plus de 1200 litres à la seconde, on est parvenu à parachever cette œuvre remarquable avec une grande rapidité et en dépensant par mètre courant de tunnel une somme inférieure à celle payée pour les autres grandes traversées des Alpes.

Nous ajouterons que si les difficultés ont été grandes, si la température a dépassé de beaucoup les prévisions les plus pessimistes, la conduite de ce travail a pu néanmoins se poursuivre sans que l'état sanitaire général du nombreux personnel occupé ait eu à souffrir.

Or, il est incontestable pour ceux qui, comme nous, ont pu suivre de près les travaux du Simplon, qu'un résultat aussi satisfaisant doit être attribué, dans une large mesure, aux soins avec lesquels le renouvellement et le rafraîchissement de l'air des galeries ont été assurés. Aussi croyons-nous qu'il peut être intéressant de donner ici quelques indications sur les procédés de ventilation et de réfrigération qui ont été appliqués, et de montrer l'importance qu'ils ont eue sur la bonne marche des travaux.

Nous voulons rappeler d'abord, à titre de comparaison, ce qui a été fait pour la ventilation des chantiers de cons-

truction des trois grandes traversées alpines qui ont précédé la percée du Simplon.

Le tableau suivant (voir page 4) reproduit les principales données intéressant la question qui nous occupe.

Au **Mont-Cenis**, la ventilation a été assurée par l'air détendu des machines à percussion du système Sommeiller employées à la perforation. L'air était comprimé à l'extérieur à 6 ou 7 atmosphères par des compresseurs à piston hydraulique, mus par des roues à augets et était amené à l'avancement dans une conduite de 0^m,20 de diamètre, débitant de 0^m,50 à 0,90 m³ d'air à la pression atmosphérique. Ce système de ventilation était complété par des aspirateurs à cloches servant à l'évacuation de l'air vicié.

La température du rocher a dépassé 29° sur une longueur de galerie de 500 m. environ. Le Docteur Giaccone, qui a été médecin du chantier Nord pendant trois ans, rapporte que, dans les parties chaudes du tunnel, l'insuffisance de la ventilation a eu une répercussion fâcheuse sur la santé des ouvriers et que l'anémie des mineurs a fait un grand nombre de victimes.

Les équipes étaient à la vérité peu nombreuses et le travail marchait avec une sage lenteur. La ventilation rudimentaire dont on disposait n'aurait d'ailleurs pu permettre un travail plus intense.

Saint-Gothard. — Comme au Mont-Cenis, la ventilation du Saint-Gothard a été faite par l'air d'échappement des perforatrices à percussion. Comprimé à 8 atmosphères, au moyen de pompes Colladon actionnées par des turbines, cet air, ramené à la pression atmosphérique, a atteint au maximum 2 m³ par seconde et est descendu parfois à 0,50 m³. On bénéficiait, il est vrai, de l'air des locomotives employées à la remorque des trains de matériaux.

La température du rocher a été supérieure sur 5 kilomètres au maximum constaté au Mont-Cenis (29°,5) et a atteint 31°.

Le faible volume d'air introduit, malgré l'abaissement de température dû à sa détente, se réchauffait si rapidement dans ce milieu que, non seulement il n'en résultait

| | Mont-Cenis. | Gothard. | Arlberg. | Simplon. | Observations. |
|---|--|------------------|------------------------|----------------------------|---|
| Longueur du tunnel | 12 849 | 14 984 | 10 240 | 19 804 | |
| Altitude du point culminant de la montagne au-dessus de l'axe du tunnel | 2949 | 2861 | 2030 | 2840 | |
| Epaisseur maxima du terrain au-dessus du tunnel | 1654 | 1706 | 720 | 2135 | |
| Température maxima de la roche en degrés centigrades | 29,5 | 31° | 18,5 | 54 ^a | ^a 56° d'après les observations de l'Entreprise Brandt, Brandau & C ^{ie} . |
| Effectif maximum approximatif d'ouvriers travaillant simultanément dans le tunnel | 250 | 400 | 700 | 800 | |
| Consommation journalière d'explosifs, environ | 200 kg. poudre comprimée | 300 kg. Dynamite | 350 kg. Dynamite gomme | 500 kg. Dyn mite gomme | |
| Volume d'air maximum introduit par seconde dans le tunnel . . | 0,50 m ³ à 1 m ³ | 2 m ³ | 3 à 6 m ³ | 36 m ³ | |
| Durée de l'exécution du tunnel, jusqu'à la rencontre des galeries d'avancement. | 13 ans, 4 mois | 7 ans, 5 mois | 3 ans, 5 mois | 6 ans, 6 mois | Durées arrondies par mois. |
| Longueur de galerie d'avancement percée en moyenne par mois . | 80 | 168 | 250 | 254 | Longueurs arrondies par mètre. |
| Dépense par mètre courant de tunnel achevé | 6130 fr. | 4470 fr. | 4050 fr. | 3900 fr. env. ^b | ^b Pour les deux tunnels, en admettant une dépense de 19,500,000 fr. pour l'achèvement du deuxième. |

aucun refroidissement perceptible du rocher, mais que la présence des hommes, la combustion des lampes et l'explosion des mines élevait encore la température de l'air à 32°,5 en moyenne et même jusqu'à 35°.

Dans une note publiée en 1883¹, M. E. Stockalper, ingénieur, ancien chef de service de la tête Nord du tunnel du Gothard, montre d'une façon saisissante les funestes conséquences qu'ont eues ces hautes températures sur le personnel ouvrier. L'anémie des mineurs, déjà constatée au Mont-Cenis, prit au Gothard une rapide extension, au point que, du côté d'Airolo, le 60 % des ouvriers en fut plus ou moins gravement atteint. Dans la mauvaise période, les ouvriers quittaient en moyenne le travail au bout de deux mois et cependant ils ne travaillaient que deux jours sur trois avec un nombre d'heures de travail journalier réduit à cinq seulement.

Le Dr Giaccone, qui fut aussi médecin au Gothard, attribue cette maladie à l'aération insuffisante, à la température élevée et à certains parasites intestinaux, dont le plus pernicieux, l'*Uncinaria (Ankylostoma) duodenalis* se trouve chez tous les malades. Ce parasite se transmet facilement dans les chantiers où l'on ne prend pas les précautions suffisantes pour la stérilisation et l'enlèvement rapide des ex-

créments hors des galeries, aussitôt que l'air de celles-ci se sature de vapeurs chaudes.

Les bêtes de trait souffrirent encore plus gravement que les hommes de ces mauvaises conditions hygiéniques ; l'entreprise perdait en moyenne 20 chevaux par mois, qui tombaient foudroyés par des congestions pulmonaires.

Arlberg. — A l'Arlberg, l'attaque ayant été faite du côté Est, à l'aide de perforatrices à air comprimé, cet air contribua à la ventilation. Mais, instruite par la fâcheuse expérience du Gothard, l'Entreprise prit la précaution d'amener un complément d'air, qu'on refoulait dans une conduite spéciale de 0^m,40 de diamètre, ce qui permettait de disposer au total d'un volume de 2,50 m³ à la seconde. Du côté Ouest, où l'on avait adopté la perforatrice rotative Brandt, à eau sous pression, la ventilation fut faite par des ventilateurs centrifuges qui lançaient une colonne d'air, à la pression initiale d'un tiers d'atmosphère effective, dans une conduite métallique de 0^m,50 de diamètre, pouvant débiter de 2 à 3 m³ par seconde.

Vers la fin des travaux, un renforcement des installations permit d'élever le volume d'air introduit à 6 m³.

Eu égard à la basse température de la roche rencontrée (18°,5) cette ventilation suffit à tous les besoins.

Les faits constatés au Gothard avaient laissé dans l'esprit des personnes compétentes l'impression qu'il n'était

¹ E. STOCKALPER. *Les grands tunnels alpins et la chaleur souterraine*. 1883.

pas possible d'abaisser sensiblement la température de l'air d'une longue galerie en construction, au-dessous de la température du rocher ambiant.

Après la rencontre des galeries de Göschenen et d'Airolo, le courant naturel avait fourni 12,50 m³ d'air à la seconde et la température du tunnel ne s'était abaissée que d'un demi-degré. Aussi concluait-on qu'à l'Arlberg — cité volontiers comme modèle — on n'eût pas mieux réussi qu'au Gothard, si la température du rocher s'y fut élevée à 31°.

On admettait, en définitive, qu'en perfectionnant les moyens de ventilation, on pourrait à la rigueur combattre dans les tunnels futurs une température allant à 40°, mais pas au delà.

Tunnel du Simplon.

Projets de 1882 et de 1891.

Avant l'adoption du projet de tunnel exécuté, de nombreux tracés ont été étudiés. Sans remonter à une date plus ancienne, nous voyons qu'en 1882, pour le projet de grand tunnel de base coudé de 20 kilomètres de longueur, le Comité du Simplon estimait, dans son mémoire technique, à 3,3 m³ par seconde le volume d'air qui serait nécessaire à la ventilation de chacune des deux attaques. On prévoyait des conduites spéciales, indépendantes de celles de la perforation mécanique, dans lesquelles l'air aurait été introduit à une pression de 1 à 1,5 atmosphère effective. L'extraction de l'air vicié au moyen d'aspirateurs à placer près des têtes du tunnel était aussi recommandée. On s'attendait à rencontrer une température maxima de 35°, et l'on comptait éviter les maladies infectieuses en développant sérieusement les mesures sanitaires si négligées au Gothard.

En 1891, un nouveau projet est élaboré. Son tracé diffère peu du précédent. Mais, pour ce qui regarde la ventilation, les idées ont changé. A la suite de nouvelles études, l'évaluation de la température de la roche est portée à 42° et l'on se préoccupe d'établir, dès la construction, des appareils de ventilation qui pourraient servir à ventiler le tunnel pendant l'exploitation.

La Compagnie Jura-Simplon émet alors l'idée de doubler la moitié Sud du tunnel (fig. 1), ce qui permettrait d'adopter le système de ventilation suivant pour l'exploitation :

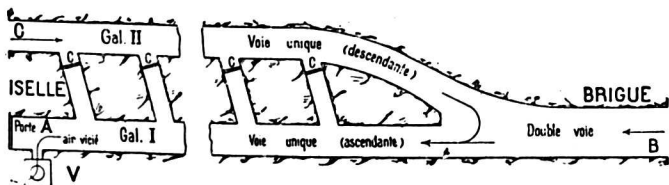


Fig. 1. — Tunnel du Simplon. Projet de 1891, avec galerie unique du côté Nord et double galerie du côté Sud. (Les flèches indiquent le sens de la ventilation).

Un ventilateur V aspirerait l'air de la branche ascendante du tunnel conjugué dont le portail A serait fermé, sauf au moment du passage des trains, et la rentrée de l'air se ferait par les deux autres ouvertures B et C laissées ouvertes.

Pendant la construction, on prévoit du côté Nord la perforation mécanique à air comprimé et l'utilisation de

cet air pour l'aérage. Une conduite indépendante en tôle, de 0^m,80 de diamètre, dans laquelle serait chassé un courant d'air, avec une surcharge initiale de 1 atm., amènerait en outre un sérieux renfort de ventilation.

Du côté Sud, on attaquerait la roche avec la perforatrice Brandt. La galerie auxiliaire (II) serait employée pour l'amenée de l'air pur ; l'autre galerie (I), reliée à la première par des transversales fermées par des cloisons c au fur et à mesure de l'avancement des travaux, servirait au retour d'air. Des ventilateurs Guibal, de 4^m,50 de diamètre, donneraient la surcharge nécessaire pour provoquer la circulation de cet air avec une vitesse suffisante.

Cette disposition en double galerie, projetée pour le côté Sud, constitue une innovation des plus intéressante. Nous tenons à faire ressortir par des chiffres les avantages qu'elle présente, au point de vue de la ventilation, sur le système proposé pour le côté Nord.

A cet effet, nous supposons qu'on veuille introduire, du côté Sud, 25 m³ d'air à la seconde, correspondant à une vitesse de 4 m. dans la galerie auxiliaire d'une section de 6,25 m². Dans les conditions les plus défavorables, c'est-à-dire quand l'attaque sera à 10 km. du portail, la surcharge à donner à l'origine pour permettre à l'air de vaincre les résistances dues au frottement contre les parois nues de la galerie, peut se calculer par la formule connue :

$$(I) \quad h = w \rho \frac{v^2}{2g} \times \frac{L}{D}$$

dans laquelle :

h = perte de charge en millimètres d'eau ;

ρ = coefficient de frottement, que nous prendrons égal à 0,07 d'après les expériences faites par M. Murgue, aux Mines de Bessèges (France) ;

w = poids moyen de 1 m³ d'air introduit ;

v = vitesse moyenne du courant en mètres ;

L = longueur de la galerie en mètres ;

D = diamètre moyen de la galerie en mètres = $\frac{4 \Omega}{p}$.

Ω étant la section de la galerie en m² et p le périmètre. A mesure qu'il avance dans la galerie, l'air se détend, sa vitesse augmente et son poids spécifique diminue. Pour l'exactitude du calcul, il faudrait prendre la moyenne de ces vitesses et de ces poids spécifiques, mais dans le cas qui nous occupe, on fait une erreur insignifiante en introduisant dans la formule la vitesse initiale et le poids d'origine au lieu de ces valeurs moyennes.

Nous admettons pour w : 1,10 kg., correspondant à une pression barométrique de 0^m,700 de mercure et une température de 20°, $v = 4$ m. ; $L = 11\ 000$, soit 10 km. de galerie auxiliaire, plus 1 km. de galerie conjuguée non encore terminée ; $D = 2^m,52$, d'où

$$h = 1,1 \times 0,07 \frac{16}{19,62} \times \frac{11\ 000}{2,52} = 274 \text{ mm. d'eau.}$$

Il faut ajouter à cette pression celle qui doit vaincre encore la résistance de 9 km. de tunnel achevé. Dans cette

partie, la section étant sensiblement égale à 24 m², la vitesse de l'air est réduite à 1^m,04, le diamètre moyen $D = 5^m,22$ et le coefficient ρ pour les parois revêtues ne dépasse pas 0,027.

Par un calcul semblable au précédent, on trouve pour la pression nécessaire

$$h' = 3 \text{ mm.}$$

La surcharge initiale à donner à l'air est donc égale à $274 + 3 = 277$ mm., ou kilogrammes par mètre carré. Abstraction faite du rendement de l'appareil compresseur, le travail moteur théorique, nécessaire pour entretenir la permanence de ce courant, sera :

$$T = \frac{277 \times 25}{75} = 92,3 \text{ HP.}$$

Du côté Nord, la conduite de 0^m,80 devait avoir, d'après le devis de 1891, une surcharge initiale d'une atmosphère. Comme elle débouche à son extrémité terminale dans un milieu où, à quelques millimètres près que nous négligeons, la pression est égale à la pression atmosphérique, nous admettons que toute la surcharge est utilisée à vaincre les résistances de la conduite. Nous employons pour calculer la perte de charge la formule donnée par M. Petit¹ pour les conduites métalliques :

$$h = 0,000765 \frac{L}{D^{1,506}} \delta V^{1,916}$$

dans laquelle :

h = perte de charge en mm. d'eau ;

L = longueur de la conduite en m. ;

D = diamètre » »

δ = poids moyen de 1 m³ d'air circulant dans la conduite ;

V = vitesse moyenne de l'air circulant dans la conduite ;

Résolue par rapport à V , cette formule devient :

$$V = \sqrt[1,916]{\frac{h \times D^{1,506}}{0,000765 \times L \times \delta}}$$

La densité de l'air à la pression atmosphérique est donnée par la formule :

$$\delta' = \frac{P}{RT}.$$

A la pression moyenne de Brigue, soit à 0^m,700 de mercure,

$$P = 0,700 \times 13600 = 9520 \text{ kg. par m}^2;$$

R = constante = 29,656 pour l'air moyennement humide ;

T = température absolue = $273 + 20 = 293$, en supposant une température moyenne de 20° dans la conduite.

$$\delta' = \frac{9520}{29,656 \times 293} = 1,095.$$

Nous admettons $\delta = 1,1$ pour la simplification du calcul.

¹ P. PETIT, ingénieur en chef des Houillères de Saint-Etienne : *Etude sur l'aérage des travaux préparatoires dans les mines à grisou.* — (Bull. Soc. Ind. Minérale, T. XIV. — 1900).

A l'origine, la pression étant de deux atmosphères, la densité de l'air sera égale à 2,2 ; d'où le poids moyen de 1 m³ d'air circulant dans la conduite :

$$\delta = \frac{2,2 + 1,1}{2} = 1,65 \text{ kil.}$$

Pour une longueur de conduite de 10 000 m., la vitesse moyenne de l'air sera égale à :

$$V = \sqrt[1,916]{\frac{9520 \times 0,80^{1,506}}{7,65 \times 1,65}} = 26^m,64,$$

ce qui donne une vitesse initiale de 17^m,77 et une vitesse finale de 35^m,54, correspondant à un débit de :

$$35,54 \times 0,502 = 17,84 \text{ m}^3 \text{ par seconde,}$$

à la pression atmosphérique.

Le travail moteur théorique nécessaire pour soutenir ce régime

$$T = \frac{17,84 \times 9520}{2 \times 75} = 1132,2 \text{ HP.,}$$

abstraction faite du rendement de l'appareil compresseur.

Avec la double galerie, on peut donc obtenir pendant la période la plus défavorable des travaux :

$$\frac{25}{92,3} = 0,27 \text{ m}^3 \text{ d'air par seconde et par HP.}$$

et avec la conduite de 0^m,80 :

$$\frac{17,84}{1132,2} = 0,016 \text{ m}^3 \text{ d'air par seconde et par HP.}$$

A égalité de force motrice, l'intensité de la ventilation serait donc, dans le cas qui nous occupe, dix-sept fois plus grande avec la double galerie qu'avec la conduite métallique.

Il serait d'ailleurs pratiquement difficile d'augmenter le diamètre de 0,80 déjà bien encombrant et de forcer, sans inconvénient, la vitesse de l'air au delà de la limite indiquée ci-dessus.

On aurait pu faire l'essai comparatif des deux systèmes en réalisant le programme des travaux de 1891. Il n'en fut pas ainsi : après des ajournements dus à des causes diverses on se décida finalement, en 1898, à exécuter le projet de 1891, remanié en 1893, en adoptant définitivement le système de la double galerie sur toute la longueur du tunnel.

Mode de ventilation

appliqué à la construction du tunnel du Simplon.

Le tunnel du Simplon a donc été exécuté en excavant deux galeries parallèles. L'une, située du côté Est, a été immédiatement élargie et mise au profil d'un tunnel à voie unique ; l'autre, que nous appelons galerie parallèle, a été laissée provisoirement à l'état de galerie de base. Elle sert à l'écoulement des eaux et ne doit être élargie qu'ultérieurement pour livrer passage à une deuxième voie. Des transversales obliques, d'une section de 6 m² environ, percées tous les 200 m., établissent des communications successives entre ces deux galeries, qui sont distantes de 15^m,90 d'axe en axe. Lorsque les deux tunnels seront terminés, cet in-

tervalle sera porté à 17 m., comme le montre la figure 2, à moins toutefois qu'on ne se décide à donner au tunnel II une largeur supérieure à celle du tunnel I, en prenant l'excédent de largeur sur le côté Ouest, ce qui augmenterait l'intervalle de la moitié de cet excédent.

Les galeries d'avancement ont été faites à la base du profil.

Pour compléter le premier tunnel, on a percé une galerie de faite, puis on a procédé aux abatages successifs en commençant par ceux de la voûte. Le tunnel a été revêtu sur toute sa longueur en maçonnant les piédroits d'abord, la voûte ensuite.

Dans la galerie parallèle, la section de 6 m², donnée par la perforatrice, a été portée à 7 ou 8 m² par un abatage à la main suivant de près le front d'attaque. Dans cette galerie, on a en outre construit le canal collecteur des eaux et revêtu provisoirement les parois où se manifestaient des pressions.

En partant du portail de cette galerie parallèle, les chantiers principaux à ventiler étaient donc échelonnés comme suit :

Construction du canal collecteur. Elargissement de la galerie parallèle. Attaque de la galerie parallèle. Attaque de la galerie I. Chantier de purge de la dite galerie. Attaque d'une transversale. Galerie de faite. Battages au large. Maçonnerie du piédroit et éventuellement du radier. Maçonnerie de la voûte. Décintrement. Rejointoiement des maçonneries. Canaux d'écoulement du tunnel I et des transversales, plus tard le ballastage et la pose de la voie.

L'attaque des galeries d'avancement et des transversales a été faite mécaniquement à l'aide de perforatrices rotatives, à eau sous pression, du système Brandt ; toutes les autres attaques du rocher ont été faites à la main.

Au moment de l'ouverture d'une nouvelle transversale les fronts de taille principaux se trouvaient parfois à 300 m. et plus de la dernière traverse achevée. Les galeries d'avancement formaient donc deux culs-de-sac qui ne pou-



Fig. 3. — Tunnel du Simplon. — Mode de ventilation appliqué aux travaux de construction, après la mise en service des ventilateurs définitifs.

vaient participer directement au bénéfice du système de la ventilation par galeries conjuguées. Comme nous le verrons, cette difficulté a été résolue en mettant à contribution la force motrice de l'eau de la perforation.

Ventilation primaire.

Ventilateurs. — Pour ventiler l'ensemble du tunnel, on lançait un courant dans la galerie parallèle, dont le portail B était fermé (fig. 3). Toutes les transversales, sauf la dernière, étant également fermées par des cloisons ou des portes C, le courant pénétrait dans le tunnel en construction en empruntant cette dernière transversale D et retournait à l'air libre par le portail A, après avoir traversé les différents chantiers d'élargissement et de maçonnerie. Les fronts de taille F F' F'' n'étant pas atteints par le courant primaire furent ventilés au moyen de prises d'air spéciales, que nous examinerons sous le titre de *ventilation secondaire*.

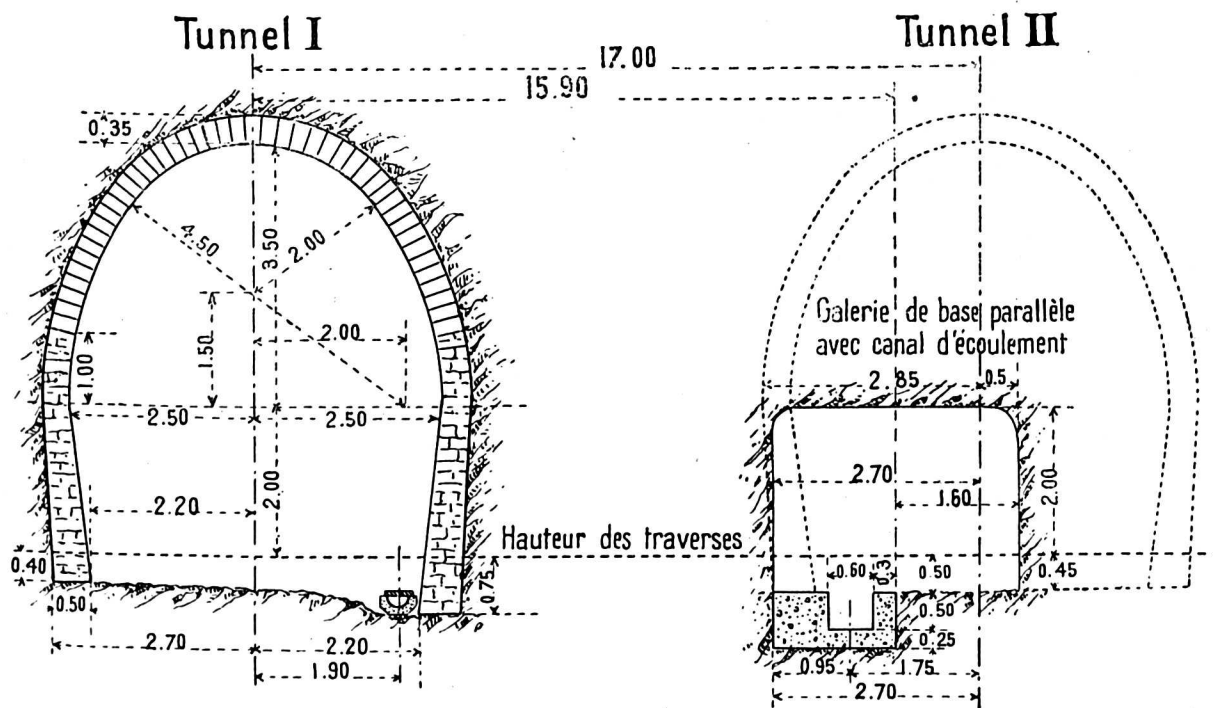


Fig. 2. — Tunnel du Simplon. — Profil-type du tunnel I et galerie parallèle avec canal d'écoulement.

Les trains de personnel et de matériaux à traction à vapeur circulaient, à l'aller comme au retour, dans le tunnel I, aussi le sens du courant était-il favorable à l'évacuation rapide des fumées et des gaz produits par les locomotives.

A Brigue, comme à Iselle, le courant de la ventilation primaire était produit par des ventilateurs, installés dans un bâtiment spécial, à proximité du portail, et actionnés par des turbines utilisant du côté suisse la force motrice du Rhône, du côté italien celle de la Diveria.

L'installation à Brigue comporte deux ventilateurs à force centrifuge, accouplés directement avec des turbines Girard à axes horizontaux. Placés l'un au-dessus de l'autre, ces ventilateurs ont chacun 3^m,75 de diamètre et sont munis de 7 ailes courbes d'une largeur de 0^m,80 à la base et 0^m,30 à la circonférence, plus 7 ailettes intercalées, avec parois latérales en tôle. Le diamètre de l'œillard est de 1^m,33. La vitesse maxima est de 400 tours par minute, donnant 78^m,53 par seconde à la périphérie.

Ces appareils sont logés dans un bâtiment en maçonnerie comprenant deux étages reliés par un escalier intérieur. Chaque étage se compose de deux locaux : l'un pour la turbine avec les conduites d'arrivée et de sortie, l'autre pour le ventilateur et ses deux prises d'air symétriques.

L'air refoulé pénètre dans un caisson rectangulaire en bois de 3 m. sur 3 m., débouchant dans un puits vertical ouvert sur le plafond de la galerie parallèle. L'étanchéité de ce canal est assez bien garantie par un revêtement intérieur en toile goudronnée.

La figure 4 donne une vue d'ensemble de cette installation.

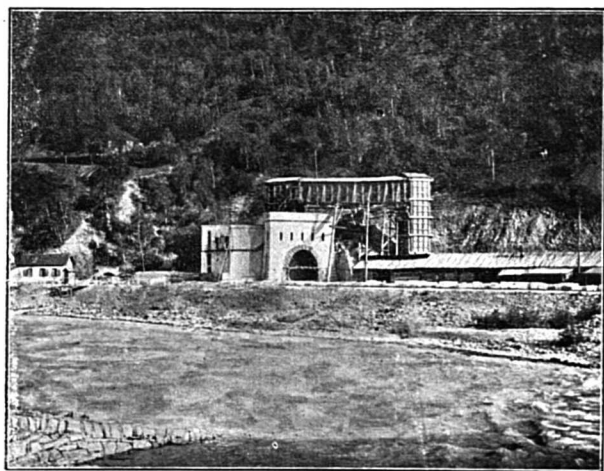


Fig. 4. — Tunnel du Simplon. — Vue du portail, côté Brigue, avec le caisson provisoire amenant l'air des ventilateurs à la galerie parallèle.

Les ventilateurs sont construits pour débiter chacun, à la vitesse de 350 tours, 25 m³ d'air par seconde avec une surcharge de 250 millimètres d'eau, et sont disposés pour réaliser les modes ci-après de ventilation :

A. Pendant la construction.

Pris isolément, chaque ventilateur peut :

1° Aspirer l'air frais de l'atmosphère et le refouler dans la galerie parallèle.

2° Aspirer l'air vicié de cette galerie et le rejeter dans l'atmosphère.

Accouplés en série, ces appareils peuvent réaliser les deux modes précédents, mais en doublant la surcharge dans le premier cas, la dépression dans le deuxième.

A Iselle, le bâtiment des ventilateurs est séparé de la tête du tunnel par la route du Simplon. Les deux ventilateurs sont placés l'un derrière l'autre, sur le même plan horizontal, et peuvent fonctionner comme ceux de Brigue.

B. Pendant l'exploitation.

Les deux portails du tunnel seront fermés par des rideaux en forte toile aménagés de façon à pouvoir être relevés rapidement au moment du passage des trains.

Les deux ventilateurs de Brigue, accouplés en quantité, refouleront l'air par une ouverture spéciale ménagée dans la voûte du tunnel terminé.

Ceux d'Iselle, accouplés également en quantité, aspireront ce même air, en produisant une dépression qui réduira d'autant la surcharge, et par conséquent le travail qu'auront à produire les ventilateurs de Brigue. De cette manière, la ventilation ne subira pas d'arrêt, mais sera seulement réduite pendant l'ouverture des rideaux et dans le cas où la force motrice viendrait à manquer d'un côté.

Des transversales laissées ouvertes mettront provisoirement la galerie parallèle au bénéfice de la ventilation, dans la mesure où le permettra la faible différence de pression qui existera entre les deux têtes du tunnel terminé.

Les figures 5 à 10 montrent l'élévation du portail, ainsi que la disposition des ventilateurs avec les turbines motrices, les prises d'air et le mode d'accouplement, suivant ce qui a été exécuté du côté de Brigue pour le premier tunnel.

La coupe 8 figure, en outre, le dispositif adopté pour la manœuvre du rideau. Ce dernier s'élève et s'abaisse à la façon d'une herse, au moyen de chaînes passant sur des poulies actionnées par un moteur électrique de 15 HP.

Les figures 11 et 12 montrent en plan et en coupe verticale la disposition qui a été adoptée pour le côté d'Iselle.

Les différents modes de fonctionnement indiqués plus haut sont obtenus, d'une manière simple et ingénieuse, par l'ouverture et la fermeture des portes représentées schématiquement, avec le local de la turbine *T*, les ventilateurs *V* et le canal de ventilation *K*, par les figures 13 à 16.

Pour chaque ventilateur on a disposé six portes : trois en relation avec l'air extérieur (*a*, *b*, *c*) et trois avec le tunnel (*d*, *e*, *f*).

En outre, deux portes pouvant mettre en communication la chambre du ventilateur du rez-de-chaussée (*A*) avec

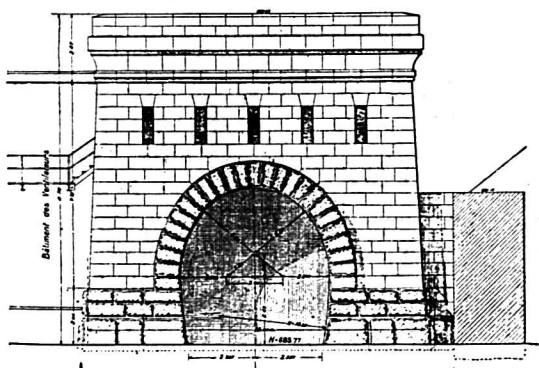


Fig. 5. — Portail du côté de Brigue. — Vue de face.

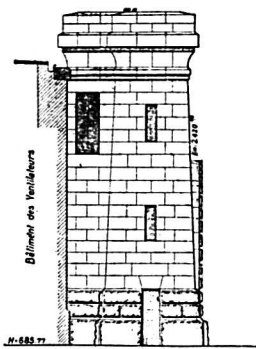


Fig. 6. — Portail du côté de Brigue. — Vue de côté.

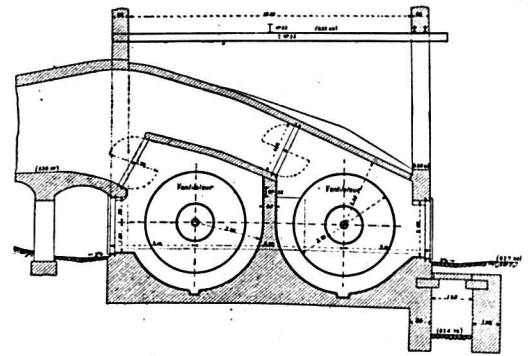


Fig. 12. — Coupe verticale A B par l'axe des ventilateurs du côté d'Iselle.

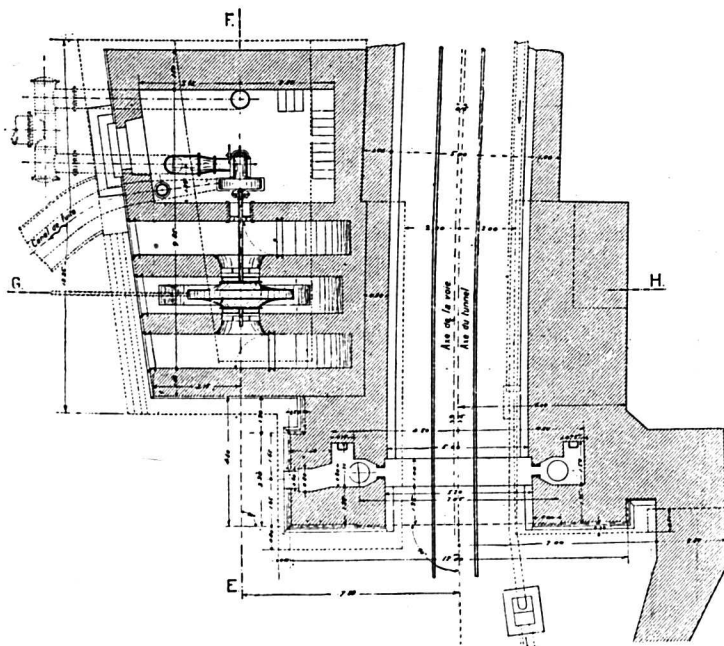


Fig. 7. — Installation de la ventilation du tunnel, du côté de Brigue. Coupe horizontale par A B, à la hauteur du ventilateur du rez-de-chaussée.

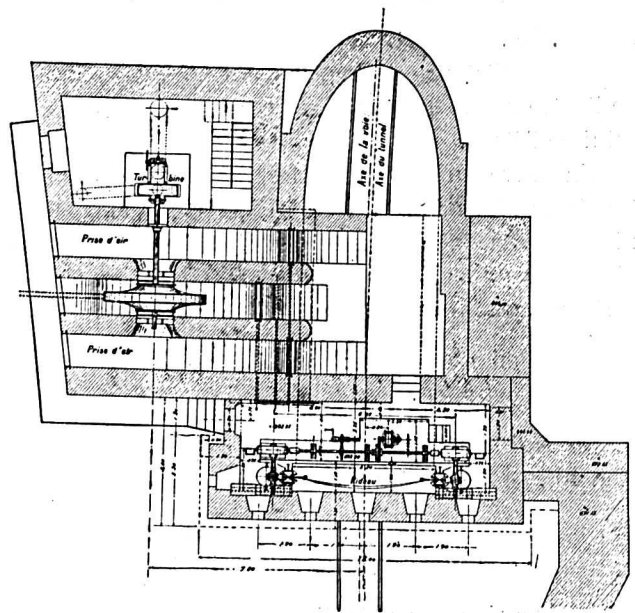


Fig. 8. — Coupe horizontale par C D, à la hauteur du ventilateur de l'étage.

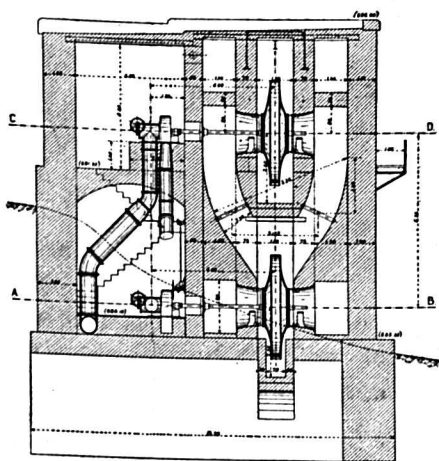


Fig. 9. — Coupe verticale par F E, montrant la disposition de l'accouplement en série.

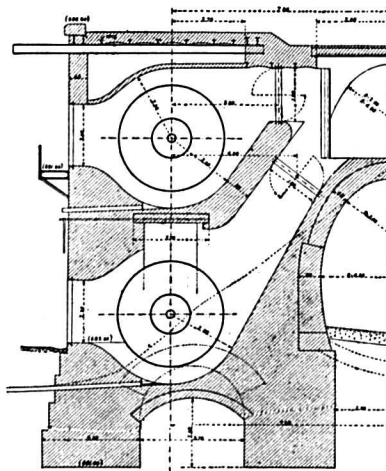


Fig. 10. — Coupe verticale par G H, montrant la disposition de l'accouplement en quantité.

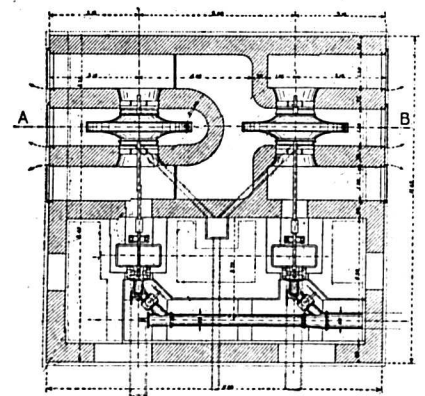


Fig. 11. — Plan des installations de la ventilation du tunnel du côté d'Iselle.

les prises d'air de celui de l'étage (B). Au total, quatorze portes jouant comme suit :

Un ventilateur en service :

1° Refoulement de l'air dans le tunnel (fig. 13).

Portes ouvertes : a, c, e.

Portes fermées : b, d, f.

2° Aspiration de l'air du tunnel (fig. 14).

Portes ouvertes : b, d, f.

Portes fermées : a, c, e.

Les portes de communication entre les ventilateurs étant fermées n'ont pas été figurées pour simplifier.

Deux ventilateurs en série.

1° Refoulement de l'air dans le tunnel à pression double (fig. 15).

Les ventilateurs superposés ont été placés l'un à côté de l'autre sur la figure : A est celui du rez-de-chaussée, B celui de l'étage.

Une ouverture rectangulaire, indiquée en pointillé, pratiquée au plafond de la chambre du ventilateur A, communique avec deux ouvertures o et o' des chambres de prise d'air du ventilateur B par un canal bifurqué dont les portes sont ouvertes.

Portes ouvertes : a, c, o, o', e'.

Portes fermées : b, d, e, f, a', b', c', d', f'.

2° Aspiration de l'air du tunnel à dépression double (fig. 16).

Portes ouvertes : d, f, o, o', b'.

Portes fermées : a, b, c, e, a', c', d', e', f'.

Il n'y a rien de particulier à noter pour l'accouplement des ventilateurs en quantité.

Quantité d'air. — Le volume de 25 mètres cubes par seconde correspond à une vitesse de 3 m. à 3^m,50 dans la galerie parallèle dont la section varie entre 7 et 8 m². Dans la galerie de base du tunnel I, qui a 6 m² environ de section, cette vitesse ascende à 4 m. et dans les parties où stationnent les trains en chargement, notamment sous les cheminées d'attaque de la galerie de faite, la présence des hommes, des wagons, des boisages, des conduites, etc., réduit la section libre effective à 4 ou 5 m². Sur ces derniers chantiers, la vitesse de l'air atteint 6 m. et plus, ce qui est bien voisin de la limite que peuvent supporter les ouvriers.

Cette grande vitesse a, en outre, l'inconvénient de transporter au loin les poussières des déblais et d'incommoder les équipes qui se trouvent à l'aval.

En fait, le volume d'air maximum qui a été lancé dans la galerie parallèle a atteint 35 à 36 mètres cubes, lorsque les ventilateurs marchaient à 400 tours, mais les pertes par les transversales, surtout par les canaux d'écoulement des eaux sous les cloisons et par l'ouverture des portes, rame-

naient ces chiffres à 20 mètres cubes environ à la distance de 9 ou 10 kilomètres du portail.

Les lampes des mineurs ne purent résister au courant et furent remplacées par des lanternes fermées dès que les ventilateurs définitifs furent mis en service.

Nous savons que c'est le système de la double galerie qui a permis l'introduction d'un tel volume d'air.

A la vérité, s'il ne se fut agi que de renouveler l'air vicié des chantiers, il eût suffi d'un volume bien moindre.

Le calcul approximatif suivant permet de fixer les idées à ce sujet :

On sait qu'un homme travaillant de force consomme facilement 40 litres d'air par minute. Or, si l'air inspiré ne contient que quelques dix millièmes d'acide carbonique, il en renferme, à l'expiration, jusqu'à 3 à 4 centièmes et l'on

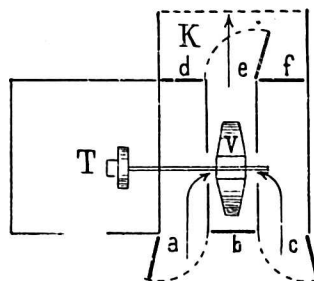


Fig. 13. — Refoulement de l'air dans le tunnel.

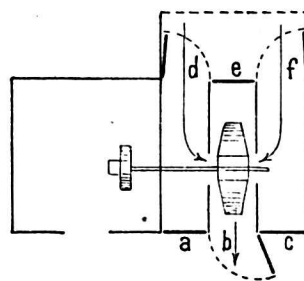


Fig. 14. — Aspiration de l'air du tunnel.

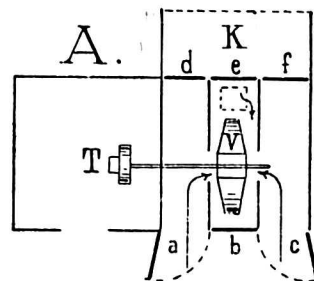


Fig. 15. — Refoulement de l'air dans le tunnel à pression double.

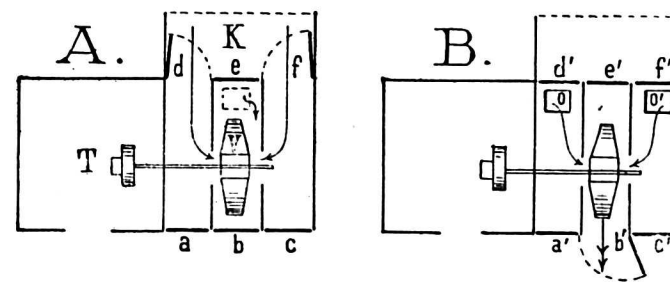


Fig. 16. — Aspiration de l'air du tunnel à dépression double.

admet qu'avec cette proportion il faut le remplacer parce qu'il devient difficilement respirable.

Admettons 1000 hommes travaillant simultanément dans les galeries et la présence d'un effectif double dans le tunnel lors du changement des postes. Une lampe de mineur étant comptée pour un homme et un cheval pour trois, il faudra renouveler, si l'on admet une vingtaine de chevaux

et une consommation de 500 kil. de dynamite par 24 heures exigeant 300 m³ d'air par kilog. :

| | |
|--|---------------------------------|
| a/ Pour les hommes : $2000 \times 0,04$ | 80m ³ , par minute |
| b/ Pour les lampes : $2000 \times 0,04$ | 80m ³ , » |
| c/ Pour les chevaux, munis de lampes : $20 \times 4 \times 0,04$ | 3m ³ ,2 » |
| d/ Pour la dynamite : $\frac{500 \times 300}{1440}$ | 104m ³ ,2 » |
| Total | 267m ³ ,4 par minute |

ou 4m³,45 par seconde.

Le calcul correspond à un travail intensif. Il montre qu'au Simplon le gros volume d'air prévu avait surtout pour but l'abaissement de la température de l'ambiance, qu'on prévoyait devoir s'élever à 40 ou 42°. Mais la température de 54° rencontrée n'a pu être assez abaissée par la ventilation proprement dite, bien qu'elle ait atteint le maximum admissible, et il a fallu faire intervenir, comme moyen auxiliaire, la réfrigération par pulvérisation d'eau froide, dont nous parlerons plus loin.

La pureté de l'air a naturellement bénéficié de l'actif renouvellement entretenu dans les galeries et nous pouvons citer à ce sujet les expériences faites par M. le Professeur L. Pagliani¹, du côté d'Iselle, et M. le Dr Pometta², médecin de l'Entreprise du côté de Brigue, sur la teneur de l'air du tunnel en acide carbonique :

Sur quinze expériences faites du côté d'Iselle, la proportion d'acide carbonique trouvée dans différents chantiers a varié de 0,50 à 7,53 ‰ et sur six expériences faites du côté Brigue, cette proportion a varié de 0,7 à 4,8 ‰ seulement. Ces dernières expériences ont été faites au moyen du carbacide (Luftprüfer) du Dr Wolpert, basé sur la décoloration d'une solution de phénolphtaléine, appareil donnant des résultats approximatifs.

Nous avons constaté, avec ce même procédé, que la proportion de CO² était beaucoup plus forte dans la galerie d'avancement au moment du passage du panache de fumée d'une attaque, aussi faisait-on évacuer la dite galerie jusqu'à ce que le nuage ait passé. Arrivée à la hauteur des chantiers d'élargissement, cette fumée était assez diffusée par la ventilation primaire pour ne pas gêner le travail. Du reste, son passage durait peu et se renouvelait à des intervalles assez éloignés.

Le tableau suivant (page 12) donne les quantités d'air fournies par les ventilateurs et les températures de cet air dans les chantiers les plus difficiles à aérer.

Pression de l'air. Nous avons vu que les ventilateurs ont été construits de manière à pouvoir débiter le volume de 25 m³ à une pression effective de 250 mm. d'eau. Il est facile de se rendre compte que cette faible pression était suffisante pour vaincre la résistance des galeries lors-

qu'elles seraient arrivées à leur plus grand développement, qu'on peut répartir en 10 km. de galerie parallèle, 1 km. de galerie de base du tunnel I et 9 km. de tunnel terminé.

En admettant comme coefficient de frottement 0,07 pour les galeries à parois nues et 0,027 pour celles à parois revêtues, un diamètre moyen de 2m,95 pour la galerie parallèle, 2m,52 pour la galerie de base et 5m,22 pour le tunnel terminé, la résolution de la formule I donne comme perte de charge :

| | |
|---------------------------|---------------|
| Pour la galerie parallèle | $h = 140$ mm. |
| Pour la galerie de base | $h' = 25$ mm. |
| Pour le tunnel terminé | $h'' = 3$ mm. |
| Total | 168 mm. |

La pression de 250 mm. admise tenait donc un compte suffisant des imprévus et des pertes qui pouvaient se produire entre les ventilateurs et la galerie.

La force motrice nécessaire pour refouler 25 m³ par seconde à la pression de 250 mm. est égale à :

$$\frac{25 \times 250}{75 \times 0,55} = 151 \text{ HP,}$$

mais comme les ventilateurs pouvaient marcher à 400 tours on les a accouplés à des turbines de 200 HP. La force motrice totale affectée au service de la ventilation était donc de 400 HP de chaque côté du tunnel.

Il n'est pas inutile de faire remarquer ici que la faculté d'envoyer un volume d'air double dans le tunnel, en accouplant les ventilateurs en quantité, était impraticable pendant la période de construction qui a précédé la rencontre des galeries Nord et Sud, période pendant laquelle l'air devait forcément circuler à l'aller, ou au retour, dans la petite galerie.

En effet, 50 m³ au lieu de 25 donnant une vitesse double, la pression correspondante, qui est en raison directe du carré de cette vitesse, est quadruplée et devient égale à $4 \times 250 = 1000$ mm. Or, dans ce cas, la force motrice nécessaire est égale à :

$$\frac{50 \times 1000}{75 \times 0,55} = 1212 \text{ HP,}$$

c'est-à-dire le triple au moins de celle dont on disposait.

Un élément important dans la détermination de la surcharge à donner à l'air est le coefficient de résistance des parois des galeries.

Les coefficients donnés par M. Murgue, adaptés à la formule I, sont les suivants, en admettant que le poids de 1 m³ d'air soit égal à 1,2 :

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| Galeries avec cadres de boisages. | 0,0942 à 0,1557 |
| Galeries à parois nues. | 0,0562 à 0,0798 |
| Galeries revêtues. | 0,0196 à 0,0405 |

Nous avons fait différents essais en vue de déterminer au Simplon le coefficient de frottement du tunnel terminé et de la galerie parallèle.

A cet effet, nous mesurons la surpression au portail au moyen d'un manomètre à U, en verre calibré, donnant directement la dénivellation en mm. d'eau. Quant à la sur-

¹ Prof. L. PAGLIANI. *Sulle condizioni igieniche e sanitarie dei lavori al Traforo del Sempione*. 1900.

² Dr Daniel POMETTA. *Sanitäre Einrichtungen und ärztliche Erfahrungen beim Bau des Simplon Tunnels*. 1906.

| Trimestres. | Côté de Brigue. | | | | Côté d'Iselle. | | | | Observations. |
|----------------------|--|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---|
| | Quantité d'air introduite par seconde. moyenne | Température de l'air en degrés C. | | | Quantité d'air introduite par seconde. moyenne | Température de l'air en degrés C. | | | |
| | | A l'extérieur | Dans la galerie de faite. | A la maçonnerie de la voûte | | A l'extérieur | Dans la galerie de faite. | A la maçonnerie de la voûte | |
| | | | | | | | | | |
| | m³ | | | | m³ | | | | |
| 1899 I | — | 3,2 | — | — | — | 1,6 | — | — | |
| II | 10,— | 16,6 | — | — | 4,— | 13,— | — | — | |
| III | 5,6 | 18,9 | — | — | 6,6 | 18,1 | — | — | |
| IV | 6,2 | 4,3 | 21,— | — | 4,7 | 4,6 | — | — | |
| 1900 I | 6,6 | — | 21,— | 19,— | 5,1 | — | — | — | |
| II | 8,5 | 13,9 | 27,5 | 25,— | 8,— | 13,2 | 27,3 | 28,— | |
| III ¹ | 11,2 | 18,4 | 28,5 | 25,— | 20,— | 17,6 | 25,— | 23,— | ¹ Mise en service de la ventilation définitive, à Iselle, le 10 juillet 1900. |
| IV | 11,3 | 5,6 | 29,5 | 26,5 | 23,— | 6,— | — | — | |
| 1901 I ² | 26,— | 0,3 | 30,— | 30,— | 24,— | — | — | 23,— | ² Mise en service de la ventilation définitive, à Brigue, le 18 mars 1901. |
| II | 20,— | 14,1 | 30,2 | 28,9 | 32,— | 13,6 | 28,— | 27,1 | |
| III | 26,5 | 17,— | 30,3 | 28,— | 30,7 | 17,— | 28,5 | 28,1 | |
| IV | 29,— | 3,9 | 29,8 | 27,9 | 27,5 | 4,3 | 24,9 | 24,6 | |
| 1902 I | 28,— | 3,— | 29,7 | 28,4 | 27,— | 3,2 | 27,5 | 25,5 | |
| II ³ | 34,7 | 12,7 | 29,— | 29,— | 17,4 | 12,8 | 24,5 | 23,5 | ³ Mise en service de la réfrigération, le 3 juin 1902, côté Brigue |
| III | 34,2 | 16,9 | 28,5 | 27,— | 19,4 | 16,6 | 26,— | 21,— | |
| IV | 28,6 | 4,6 | 26,— | 28,— | 30,7 | 5,— | 26,— | 25,— | |
| 1903 I | 32,2 | 3,— | 31,— | 29,5 | 33,— | 3,5 | 25,5 | 25,— | |
| II | 29,5 | 12,7 | 27,5 | 29,— | 31,7 | 12,— | 27,5 | 27,— | |
| III | 31,1 | 17,5 | 32,— | 31,— | 28,6 | 16,6 | 29,5 | 29,5 | |
| IV | 26,3 | 4,8 | 32,5 | 34,— | 28,2 | 5,6 | 29,5 | 30,— | ⁴ Fermeture des portes de sûreté et suppression de la ventilation secondaire, côté Brigue, le 28 mai 1904. |
| 1904 I | 28,3 | 2,2 | 31,— | 31,5 | 31,3 | 2,6 | 29,5 | 29,5 | |
| II ⁴ | 27,3 | 15,— | 33,— | 32,5 | 25,4 | 14,5 | 29,5 | 29,5 | |
| III ⁵ | 33,9 | 17,2 | 30,5 | 31,5 | 27,3 | 17,7 | 29,— | 29,— | ⁵ Mise en service de la réfrigération, côté d'Iselle, le 12 sept. 1904. |
| IV | 34,— | 3,8 | 30,5 | 29,— | 28,5 | 5,6 | 31,— | 30,5 | |
| 1905 I ⁶ | 34,4 | 1,— | — | 32,5 | 32,6 | 2,6 | 30,— | 31,5 | ⁶ Rencontre des deux galeries le 24 février 1905. |
| II ⁷ | 52,— | 13,5 | 30,5 | 31,— | 32,1 | 12,9 | 33,— | 33,— | |
| III ⁸ | 55,— | 17,— | 28,5 | 30,— | 36,6 | 17,3 | — | 32,— | ^{7, 8, 9} De Brigue, on refoule l'air par le tunnel I. |
| IV ⁹ | 57,— | 2,6 | — | — | 34,1 | 4,3 | — | — | |
| 1906 I ¹⁰ | 80,— | — | — | — | — | — | — | — | ¹⁰ Tous obstacles enlevés, le courant passe directement de Brigue à Iselle par le tunnel I. |

pression d'un deuxième point situé à l'intérieur de la galerie à des distances diverses du portail, elle était déterminée comme suit :

On établissait, à une heure fixée, la pression atmosphérique, telle qu'elle devait exister au point considéré, en faisant abstraction de la ventilation, et on mesurait au même instant la pression réelle existant en ce point. La différence donnait la surcharge. En comparant cette dernière à la charge au portail, on avait par différence la mesure de la perte h . Introduite dans la formule 1, résolue par rapport au coefficient $\rho = \frac{2ghD}{V^2 L \omega}$, nous avons obtenu, pour ce coefficient, les valeurs suivantes :

Expérience du 23 juin 1905 $\rho = 0,02596$
 » 24 » 0,02621
 » 24 » (2^e exp.) 0,02666

Expérience du 6 juill. 1905. 0,02832
 » 6 » (2^e exp.) 0,02517
 » 6 » (3^e exp.) 0,02203
 » 17 » 0,03124
 » 18 » 0,03404
 dont la moyenne est $\rho = 0,027454$.

Comme instruments, nous disposions du baromètre normal de la station météorologique, installé à côté du portail de Brigue et permettant de lire le $\frac{1}{20}$ de millimètre de mercure ; d'un grand baromètre anéroïde Goldsmid, vérifié spécialement par la maison Usteri-Reinacher, de Zurich ; de chronomètres battant le $\frac{1}{5}$ de seconde et de thermomètres contrôlés donnant le $\frac{1}{10}$ de degré C. Les vitesses de l'air dans les galeries étaient mesurées au moyen d'anémomètres de la maison Fuess, de Steglitz, près Berlin, instruments à moulinets de deux modèles différents ; l'un (fig. 17), pour les faibles vitesses allant de 0^m,50 à 12 m, à

la seconde, l'autre (fig. 18), plus robuste, pour les vitesses plus grandes allant jusqu'à 50 m., est accompagné d'une table de correction. Nous mesurions en outre l'humidité de l'air avec un psychromètre à aspiration d'Assmann, et les teneurs absolues en vapeur d'eau étaient calculées au moyen des tables de Jelinek.

La densité de l'air était calculée à chaque expérience.

Pour tenir compte de la rampe du tunnel, on admettait qu'à l'altitude de Brigue (680 m.) la pression atmosphérique diminue de 1 mm. de mercure par dénivellation de 11^m,50.

Le calcul des pressions était fait avec réduction à 0°, en corrigeant du reste, à l'entrée et à la sortie du tunnel, les petites différences qui existaient entre les indications de l'anéroïde et celles du baromètre normal.

Pendant les expériences, on avait réduit à un minimum négligeable les pertes d'air par les transversales, en fermant les principaux orifices de communication sur la section considérée.

En opérant d'une manière semblable dans la galerie parallèle, nous avons obtenu pour les parois nues un coefficient moyen $\rho = 0,06676$.

On pouvait vérifier les calculs dans ce dernier cas en mesurant directement, à travers une cloison transversale, avec un manomètre à U, la différence de pression existant entre les deux galeries ; connaissant la perte de charge dans la galerie voûtée, on en déduisait celle de la galerie à parois nues.

Les coefficients ci-dessus peuvent être considérés comme offrant une exactitude suffisante, eu égard à la longueur exceptionnelle des galeries sur lesquelles on a expérimenté, longueurs qui se sont élevées jusqu'à 6 et 8 km.

Ventilation des chantiers. — En suivant le courant, à partir de l'embouchure du caisson rectangulaire dans la galerie parallèle, on peut remarquer la double porte pour piétons de 1^m,80/1,00 fermant l'entrée de cette galerie. Chaque porte est munie d'un guichet en tôle de 0,30/0,30 pivotant sur axe vertical et permettant d'obtenir par son ouverture une pression égale sur les deux faces. Un contre-

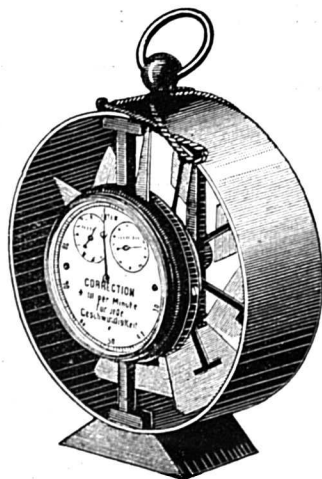


Fig. 17. — Anémomètre permettant de mesurer la vitesse de l'air de 0^m,50 à 12 m. à la seconde.

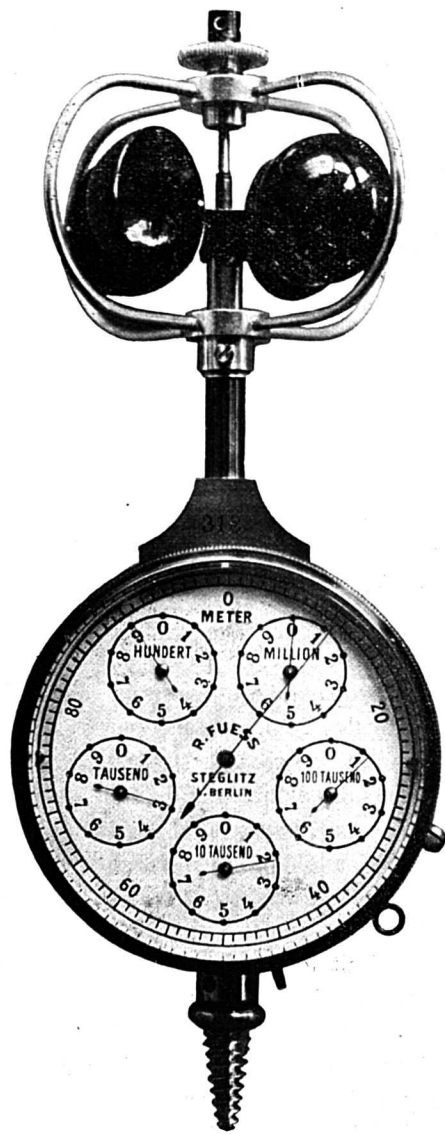


Fig. 18. — Anémomètre permettant de mesurer la vitesse de l'air de 0^m,50 à 50 m. à la seconde.

poids, avec chaînes et poulies, facilitait en outre l'ouverture de la deuxième porte. Chaque ouverture occasionnait la perte d'une éclusée d'air. Il se produisait fréquemment d'ailleurs des fuites aux joints et surtout par le canal collecteur passant sous les portes.

On avait transformé en locaux de service diverses transversales, fermées par une cloison en briques du côté de la galerie parallèle et par un panneau en bois, avec porte, du côté du tunnel I. Ces locaux servaient de magasins pour les amorces, les cartouches de dynamite, et de bureaux pour les employés. Pour aérer ces locaux avec l'air frais de la galerie parallèle, on avait ménagé dans la paroi en briques de petites ouvertures par où l'air pénétrait en quantité suffisante, par l'effet de la différence de pression existant sur les deux faces de la cloison.

Après avoir traversé la dernière transversale ouverte, l'air pénétrait dans la galerie de base du tunnel I et ne tardait pas à y rencontrer les chantiers d'attaque de la galerie de faite. Pour forcer une partie du courant à monter dans les cheminées verticales et à se répandre dans les culs-de-

sac du faite, on tendait sur un cadre, en travers de la galerie de base, un écran en toile *E* (fig. 19) qui occupait une partie plus ou moins grande de la section libre. Cet écran, simplement retenu par des crochets, était relevé à la demande des piétons ou des conducteurs de wagonnets par un ouvrier occupé aux abords.

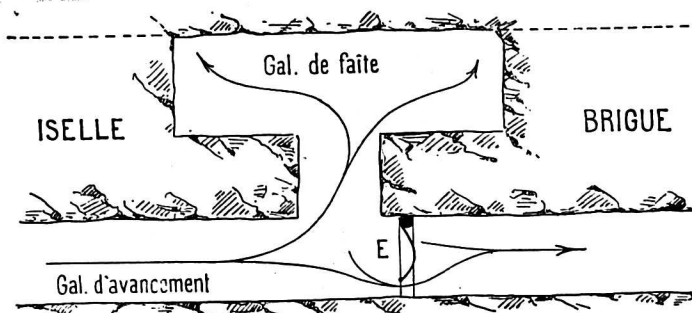


Fig. 19. — Ventilation de la galerie de faite au moyen d'un écran mobile *E* placé dans la galerie de base.

Lorsqu'on arriva dans les parties chaudes, ce moyen ne suffit plus et le système d'attaque de la galerie de faite par cheminées verticales fut remplacé par le mode d'excavation que nous figurons ci-après (fig. 20 à 22).

On commençait par relever de 1 m. le plafond de la galerie d'avancement, sur une longueur de 10 à 12 m. environ, en s'échafaudant sur les déblais, tout en laissant libre le passage des wagonnets (coupe AB), puis, pour attaquer à des hauteurs supérieures, on faisait un pont, dont le tablier était formé de huit fortes longrines jointives, et on laissait s'accumuler sur celui-ci une hauteur de déblais suffisante pour permettre aux ouvriers d'atteindre le faite (coupe CD). On déchargeait l'excédent, par dessous, au moyen de trappes ayant 0^m,60 sur 0^m,80 et par les deux extrémités du pont. Ce mode, très pratique, permettait une excellente ventilation. On faisait en même temps le battage au large et l'on avançait progressivement en enlevant en arrière une longueur de pont de 8 à 10 m. qu'on reportait en avant.

Le courant traversait ensuite les chantiers de maçonnerie sans dispositifs spéciaux, et suivait de là le tunnel terminé, en refoulant vers le portail les fumées des trains d'ouvriers et de matériaux.

Ventilation secondaire.

Injecteurs. — La ventilation primaire n'atteignant pas, comme nous l'avons vu, les chantiers d'attaque des galeries d'avancement, on est parvenu néanmoins à aérer ceux-ci d'une manière satisfaisante au moyen d'air repris à la ventilation primaire et amené par des conduites métalliques jusqu'aux chambres de travail. Cet air est aspiré dans la galerie parallèle, quelques mètres avant la dernière transversale terminée et refoulé dans une conduite en tôle, ouverte aux deux bouts, au moyen d'un injecteur d'eau branché sur la conduite à haute pression des perforatrices. L'eau est évacuée après usage au moyen de siphons placés à la base de tuyaux spéciaux de section oblongue disposés

le long de la conduite, de manière à n'envoyer que de l'air sec aux fronts d'attaque.

On a employé successivement, au fur et à mesure de l'accroissement de la température, des conduites de 0,20, 0,30 et 0^m,40 de diamètre (fig. 23).

Nous résumons ci-dessous les résultats de quelques expériences faites en janvier et février 1902 sur ces appareils.

Le 17 janvier 1902 l'appareil de la galerie parallèle était établi comme ci-après :

| | |
|--|---------------------|
| Longueur totale de la conduite | 96 mètres. |
| Diamètre | 0 ^m ,20. |
| Pression de l'eau au manomètre | 75 atm. |
| Volume d'eau injectée, jaugé aux siphons d'évacuation, en litres par seconde . . . | 1,80 |

L'eau, passant au travers d'une plaque percée de trois trous de 3 mm. de diamètre, avait une vitesse de 85 m. à la seconde à la sortie de l'injecteur.

| | |
|---|------------|
| Longueur de conduite occupée par les tuyaux à siphons | 40 mètres. |
|---|------------|

La conduite de 56 m. venant à la suite était formée de tuyaux à brides assez étanches et ne comportait aucune prise secondaire sur son parcours.

La pression de l'air, mesurée au moyen d'un manomètre à *U*, dont une branche pénétrait dans l'intérieur de la conduite par un trou préparé dans ce but, a été trouvée de 204 mm. d'eau à 40 m. de l'injecteur, c'est-à-dire en un point où l'on pouvait considérer l'air comme purgé de l'eau d'injection.

À l'extrémité terminale de la conduite, la vitesse de l'air, constatée à l'anémomètre, était de 32 m., donnant un débit de 1 m³ à la seconde. La température de l'air, prise aux points où l'on mesurait la pression et la vitesse, était en moyenne de 18°.

Si l'on compare à cette vitesse d'expérience celle donnée par la formule de Gustave Schmidt, basée sur les expériences faites par M. Ernest Stockalper au tunnel du Gothard, on trouve, en admettant que toute la surcharge soit absorbée par les frottements :

$$v = \sqrt{\frac{10^{10} \times d \times z}{785 L \gamma \left(5 + \frac{1}{d}\right)}} = \sqrt{\frac{10^{10} \times 0,20 \times 0,204}{785 \times 56 \times 1,09 \left(5 + \frac{1}{0,20}\right)}} = 29 \text{ m. au lieu de } 32 \text{ m.}$$

v = vitesse en mètre. *d* = diamètre de la conduite en m. *z* = perte de charge en m. d'eau. *L* = longueur de la conduite en m. *γ* = poids de 1 m³ d'air contenu dans la conduite.

Le 14 février suivant, ce même appareil avait 191 m. de longueur : un 2^e injecteur, de la force du premier, avait été placé à 97 m. de celui-ci, suivi par des tubes d'évacuation de 42 m. de longueur. La pression de l'air à l'origine des 52 m. de conduite venant à la suite était encore de 204 millimètres d'eau. L'anémomètre accusait une vitesse finale

de 0^m,788 de longueur, remplis de glace, offrant, sous un faible volume, une surface froide de 50 m² en contact avec l'air de la ventilation.

L'effet utile de cet appareil, très intense au début, allait en diminuant assez rapidement et devenait nul après deux heures de service, en sorte qu'il fallait amener dans la galerie d'avancement une douzaine de wagons-réservoirs par journée de 24 heures pour entretenir un peu de régularité dans cette réfrigération. La disposition, indiquée à la figure 27, permettait de substituer un wagon à l'autre sans interrompre la ventilation et donnait aussi la faculté de modérer l'action de l'appareil, en laissant passer en dehors du réservoir une partie de l'air, qu'on pouvait graduer en ouvrant plus ou moins les valves d'admission.

Comme il n'était pas facile de déplacer souvent ce dispositif, de même que la voie du chariot qui y donnait accès, le réservoir se trouvait généralement assez en arrière de l'avancement et son effet se trouvait alors peu marqué au front d'attaque, mais il n'en rafraîchissait pas moins la galerie d'avancement et c'était un gain dont bénéficiaient plus tard les chantiers d'élargissement.

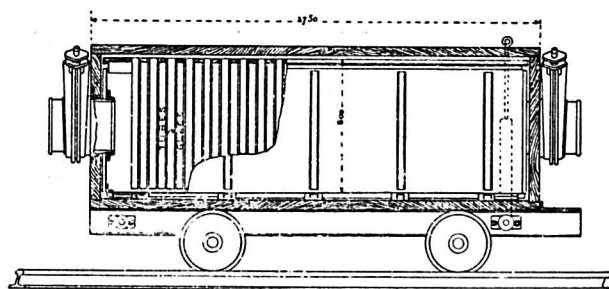


Fig. 24. — Ventilation secondaire.
Réservoir tubulaire à glace employé du côté de Brigue.

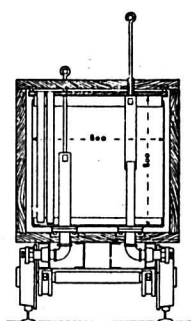


Fig. 25. — Section de réservoir à glace avec dispositif pour le remplissage de l'espace intertubulaire par un mélange réfrigérant.

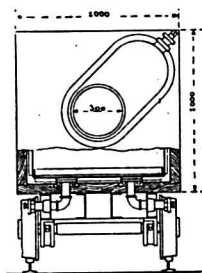


Fig. 26. — Section du réservoir à glace montrant les tubes de vidange du mélange réfrigérant.

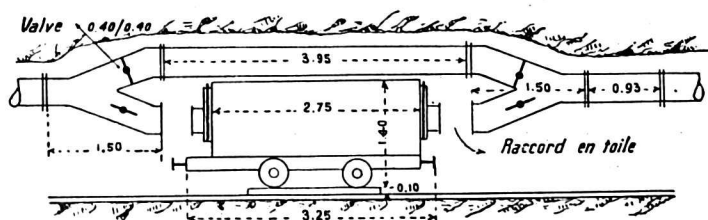


Fig. 27. — Mode d'intercalation du réservoir à glace sur la conduite de la ventilation secondaire.

Après quelques essais, ce réservoir à glace a été mis en service en août 1902 et a fonctionné régulièrement jusque vers la fin de l'année. Puis on a suspendu et finalement supprimé l'emploi de la glace parce que les inconvénients que présentaient les remplacements si fréquents des réservoirs dans le tunnel dépassaient les avantages immédiats qu'on en retirait.

La fabrication de la glace se faisait à l'extérieur, dans un bâtiment construit spécialement en face de la halle aux machines et permettant de glacer simultanément les tubes de 8 wagons-réservoirs. L'intervalle entre les tubes était rempli d'un mélange réfrigérant (eau salée) à -16° qui suffisait à transformer en glace l'eau contenue dans les tubes. Quant à l'eau salée, sa température était abaissée dans un grand réservoir, au contact d'un serpentin dans lequel on gazéifiait de l'ammoniaque. Pour produire la circulation de cet ammoniaque, on utilisait, comme compresseurs, les cylindres d'une locomobile de réserve agencés pour ce service. La force était prise sur un arbre de transmission de la salle des machines. La liquéfaction de l'ammoniaque s'opérait dans un serpentin immergé dans l'eau froide du canal de fuite des turbines.

Les figures 28 à 31 représentent la disposition adoptée. On remarque la pompe centrifuge qui reprend l'eau salée après usage et la refoule dans le grand réservoir. Il y a un circuit fermé pour le mélange réfrigérant, comme pour l'ammoniaque et, sauf quelques pertes faciles à récupérer, les matières employées servaient indéfiniment.

Ventilateurs de tunnel. — On a tenté de remplacer les injecteurs de la ventilation secondaire par de petits ventilateurs de tunnel pouvant donner une surcharge de 500 mm. d'eau, en marchant à la vitesse de 2500 tours par minute. Ces appareils étaient doubles et pouvaient être mis en série; dans ce cas, la surcharge était portée à 1000 mm. Accouplés à de petites turbines Pelton, ils devaient consommer chacun $1\frac{1}{2}$ à 2 litres d'eau par seconde et absorber une force de 10 chevaux.

Ces ventilateurs représentés fig. 32 ont fonctionné quelque temps, et l'on est revenu à l'emploi des injecteurs.

Abaissement de la température au front d'attaque, côté Brigue. — Le tableau suivant (page 19) résume les principaux résultats obtenus par la ventilation secondaire du côté de Brigue. Les quantités d'air et les températures indiquées sont des moyennes trimestrielles. La température du rocher a été relevée au moyen de thermomètres isolés dans des trous de mines spéciaux de 1^m,50 de profondeur. Dans les parties très chaudes, on l'a relevée dans les trous mêmes des perforatrices, à l'avancement.

On remarque à partir du p. k. 5733 un abaissement sensible de la température de l'eau d'injection et de l'air amené dû à l'isolation de la conduite d'eau, au moyen d'une enveloppe de charbon de bois pulvérisé. Cet abaissement a été accentué par des aspersions d'eau froide sur la conduite de la ventilation secondaire. L'augmentation du volume de l'air est en relation avec l'adoption de conduites de venti-

COTÉ DE BRIGUE. — FABRICATION DE LA GLACE

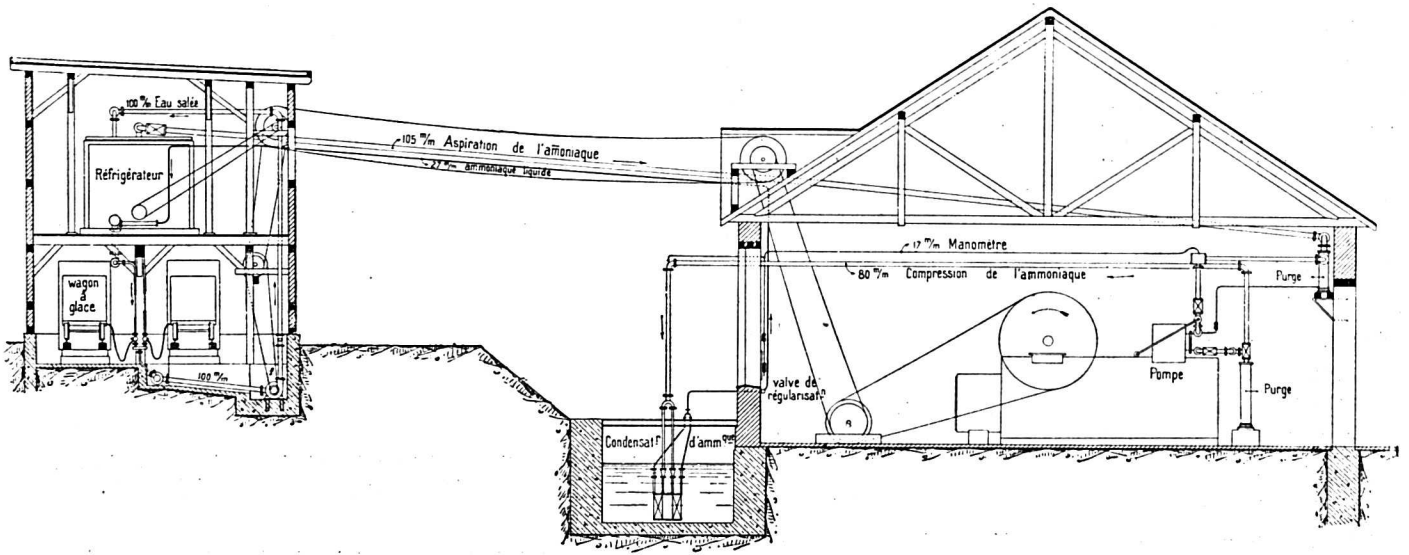


Fig. 28. — Coupe transversale de la halle aux machines et du bâtiment servant à la fabrication de la glace.
A l'étage de ce dernier se trouve un grand réservoir contenant le mélange réfrigérant. Au rez-de-chaussée sont les wagons-réservoirs à glace.

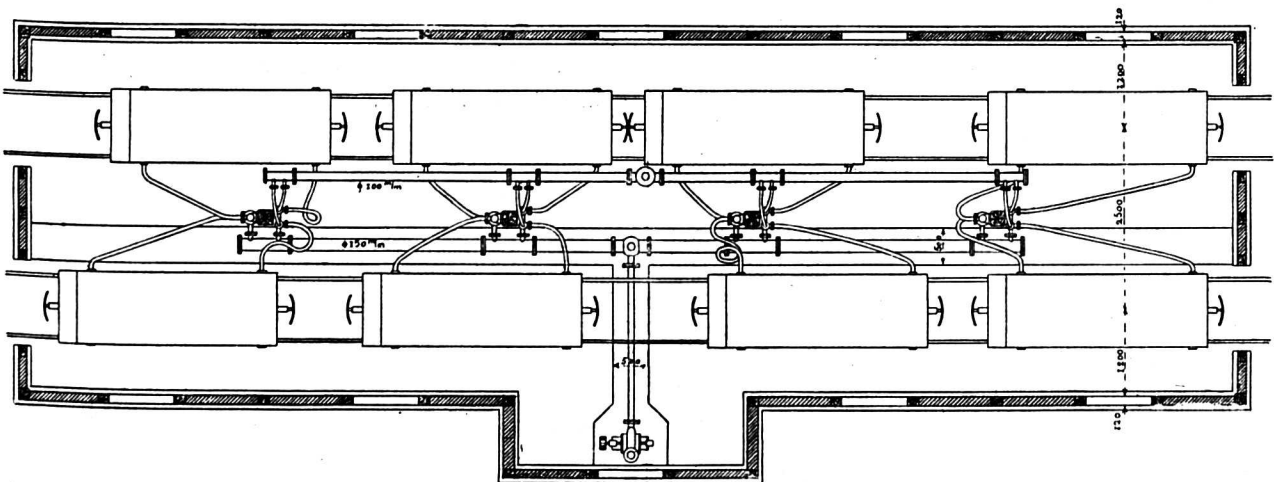
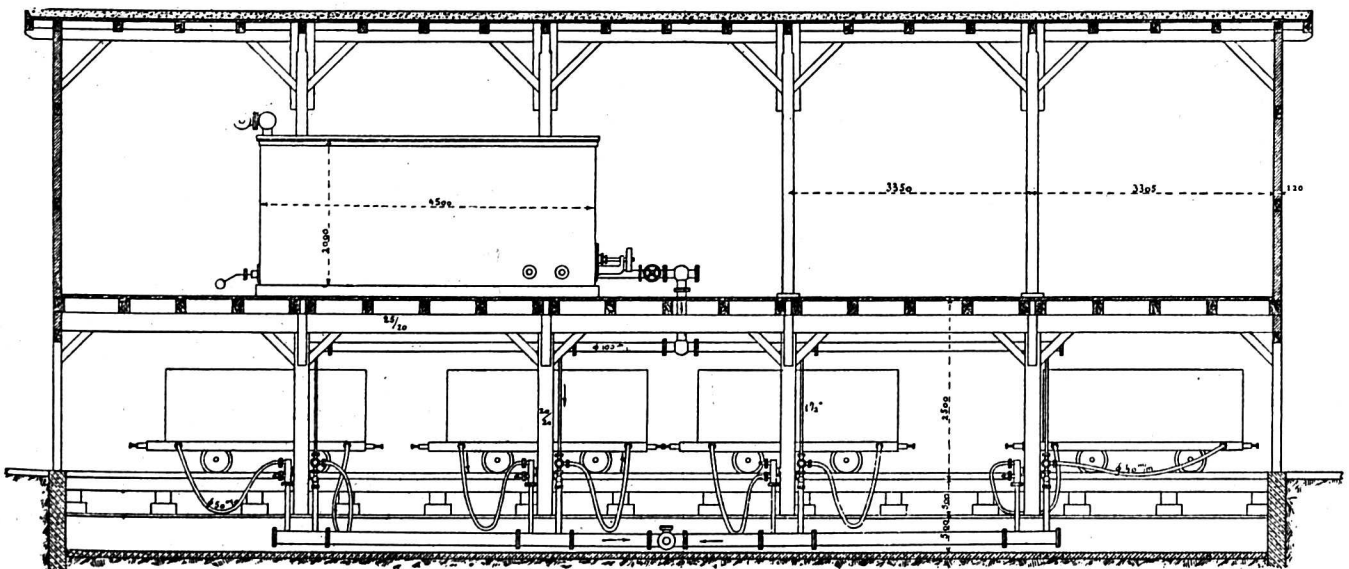


Fig. 29 et 30. — Coupe longitudinale et plan de l'installation servant au remplissage et à la vidange des wagons-réservoirs à glace.

lation d'un diamètre de plus en plus grand et l'emploi d'un plus grand nombre d'injecteurs.

Pour l'ensemble de la ventilation secondaire (galeries I, II et transversales) on a employé parfois simultanément 7 injecteurs débitant chacun 2 litres-seconde. A la pression initiale de 100 kg. par centimètre carré cela donne plus de 200 chevaux. Cette consommation de force est une conséquence et un inconvénient du système de la ventilation par double galerie. Mais remarquons, en revanche, les avantages extraordinaires qu'on en a retirés : dans la zone où la température du rocher a dépassé 50°, on a obtenu un abaissement moyen de température de 26°,6 pendant la perforation et de 23°,6 pendant le marinage, et cela à une distance allant à 9500 m. du portail. Ces chiffres sont à retenir, car ils représentent un progrès considérable sur ce qui a été fait précédemment et montrent que la chaleur souterraine, cette dernière difficulté à combattre dans le percement des grands tunnels alpins, difficulté contre laquelle on paraissait désarmé après le Gothard, peut être vaincue désormais.

Quant à la quantité de chaleur enlevée par l'air, on peut faire remarquer que, dans cette même zone de hautes températures, le nombre de calories enlevées en moyenne par seconde a été de 4,57 pendant le marinage et de 3,03

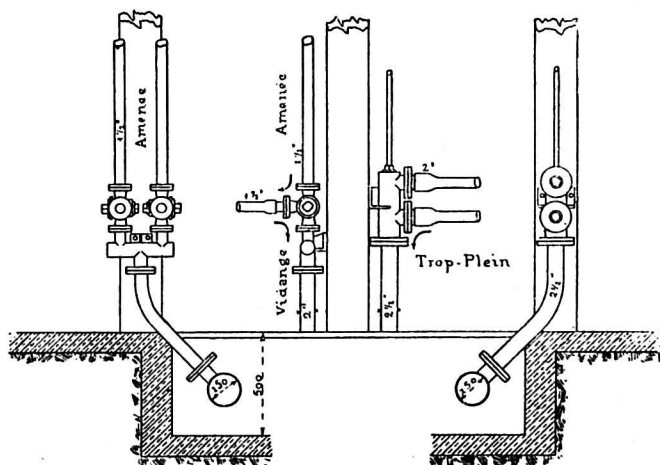


Fig. 31. — Remplissage et vidange des wagons-réservoirs à glace
Détail de la robinetterie.

pendant la perforation. Pendant le marinage, l'air est le seul agent mis en jeu pour le refroidissement, et le nombre de calories dont il se charge donne la mesure complète de la chaleur enlevée, ce qui permet de dire qu'une calorie emportée correspond à un abaissement de $\frac{23,6}{4,57} = 5°,16$. Pendant la perforation, le refroidissement du milieu a donc exigé l'enlèvement de $\frac{26,6}{5,16} = 5,15$ calories par seconde. Or, nous avons vu que l'air en emporte 3,03. La différence 5,15 — 3,03 = 2,12 représente la chaleur enlevée par l'eau des perforatrices, ce qui n'a rien que de très vraisemblable puisque la quantité d'eau consommée par ces dernières — 6 litres-seconde — peut s'en charger moyennant une élévation de température de $\frac{2,12}{6} = 0°,35$ pendant son trajet dans la chambre de travail.

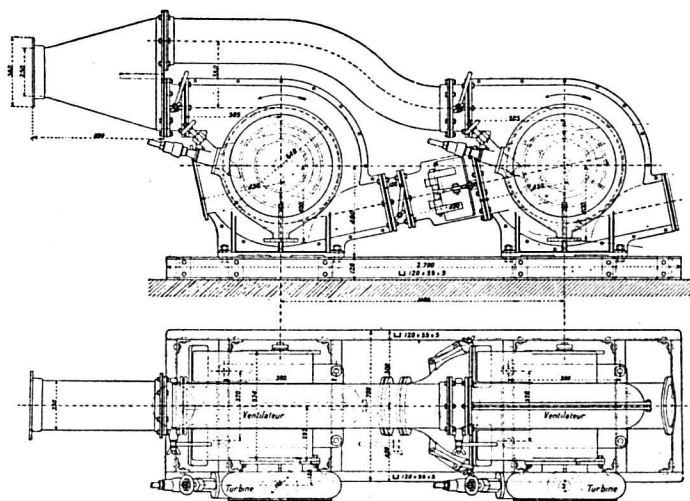


Fig. 32. — Petit ventilateur de galerie employé pour la ventilation secondaire en remplacement des injecteurs.

L'emploi de la perforatrice hydraulique contribue donc pour les $\frac{2}{5}$ environ dans l'enlèvement de la chaleur pendant la perforation.

Ventilation provisoire.

Les ventilateurs définitifs dont nous avons parlé n'ont pu être terminés et mis en service que le 18 mars 1901 à Brigue et le 10 juillet 1900 à Iselle. A ces dates, l'avancement était à 4600 m. du portail du côté suisse et à 2400 m. du côté italien. On a donc percé 7000 m. de tunnel avec des moyens provisoires que nous indiquons ci-dessous.

Côté de Brigue (Première période). — Dès le début et jusqu'en décembre 1898 (fig. 33), on a ventilé au moyen d'un petit ventilateur provisoire, à ailettes, actionné d'abord par un moteur à pétrole, ensuite par une machine à vapeur. La conduite, dans la galerie I, est en tôle de 0^m,30 de diamètre; un canard en bois, branché sur cette conduite ventile la galerie II. Le volume d'air débité n'a pas été mesuré. Pendant cette période, on construit un puits d'aérage et l'on pose la conduite d'eau de la haute pression, qui servira pour la ventilation secondaire. Ce système a fonctionné jusqu'au p. kil. 0,300.

2^{me} période. — De décembre 1898 au 1^{er} juin 1900 (fig. 34), les deux modes de ventilation (primaire et secondaire) fonctionnent.

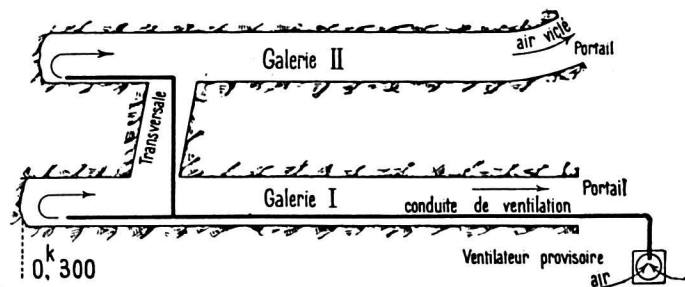


Fig. 33. — Première période de la ventilation provisoire du côté de Brigue.

Ventilation secondaire de la galerie I, côté Brigue.

| Position kilométrique | Température en degrés C. | | | | | Quantité d'air introduite. m³ par secondé. | Abaissement de la température de l'ambiance | | Quantité de chaleur enlevée par l'air dans la chambre de travail | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|---|-------------------------|--|---|---------------------------|--|--|------|
| | moyenne du rocher | de l'air au front d'attaque | | de l'air à la sortie du tube de ventilation | de l'eau d'injection | | pendant la perforation | pendant le marinage | pendant la perforation Calories par sec. | pendant le marinage Calories par sec. | |
| | | pendant la perforation | pendant le marinage | | | | | | | | |
| 1293 | 16,— | 19,6 | 21,5 | 18,— | — | 0,24 | La tempéra- ture de l'air est plus élevée que celle du rocher. | | 0,11 | 0,23 | |
| 1837 | 20,— | 21,— | 23,6 | 19,— | — | 0,22 | | | 0,12 | 0,26 | |
| 2300 | 21,4 | 21,5 | 23,6 | 20,— | 11,7 | 0,20 | | | 0,08 | 0,19 | |
| 2770 | 22,6 | 24,— | 25,8 | 20,9 | 15,5 | 0,40 | | | 0,32 | 0,51 | |
| 3252 | 26,7 | 28,— | 30,— | 25,7 | 20,6 | 0,40 | | | 0,24 | 0,45 | |
| 3735 | 28,6 | 27,8 | 29,8 | 27,— | 21,4 | 0,43 | | 0,8 | 0,09 | 0,31 | |
| 4119 | 28,6 | 29,8 | 30,5 | 27,— | 22,5 | 0,53 | | — | 0,39 | 0,48 | |
| 4693 | 30,— | 29,5 | 30,6 | 27,8 | 21,— | 0,50 | | 0,5 | 0,37 | 0,36 | |
| 5195 | 32,3 | 31,1 | 32,3 | 29,— | 22,6 | 1,18 | | 1,2 | — | 0,65 | 1,02 |
| 5733 | 35,— | 28,8 | 31,3 | 26,— | 15,3 | 1,39 | | 6,2 | 3,7 | 0,99 | 1,92 |
| 6335 | 38,4 | 28,7 | 31,— | 25,1 | 12,7 | 1,85 | 9,7 | 7,4 | 1,74 | 2,84 | |
| 6884 | 41,3 | 27,5 | 30,— | 20,9 | 10,6 | 1,99 | 13,8 | 11,3 | 3,43 | 4,73 | |
| 7417 | 49,2 | 28,9 | 31,— | 23,9 | 15,— | 2,43 | 20,3 | 18,2 | 3,17 | 4,50 | |
| 7888 | 52,3 | 25,— | 28,— | 20,4 | 15,7 | 2,70 | 27,3 | 24,3 | 3,24 | 5,36 | |
| 8469 | 53,2 | 24,6 | 28,6 | 20,— | 13,— | 1,70 | 28,6 | 24,6 | 2,04 | 3,82 | |
| 8931 | 53,4 | 26,2 | 29,5 | 19,— | 14,— | 1,53 | 27,2 | 23,9 | 2,87 | 4,19 | |
| 9427 | 50,8 | 27,5 | 29,3 | 19,9 | 11,3 | 2,— | 23,3 | 21,5 | 3,97 | 4,90 | |
| 9950 | 48,6 | 26,7 | 31,— | 21,5 | 15,— | 1,40 | 21,9 | 17,6 | 1,90 | 3,47 | |
| 10177 | 47,— | 29,2 | 31,3 | 25,— | 17,2 | 1,03 | 17,8 | 15,7 | 1,13 | 1,69 | |

L'aspiration est produite par un puits d'aérage de 48 m. de hauteur et 2^m,50 de diamètre, établi à 71 m. de l'embouchure de la galerie de direction, puits dans lequel on entretient un feu actif sur une surface de grille de 8^m²,75. L'air entre par la galerie parallèle, passe dans le tunnel I par la dernière transversale laissée ouverte et s'échappe par le puits. L'embouchure de la galerie I et celle de la galerie de direction sont fermées pour éviter les rentrées d'air. Le volume d'air aspiré a atteint 10 m³ à la seconde au début et est allé en diminuant jusqu'à 6 m³, au fur et à mesure de l'allongement des galeries.

Des injecteurs reprennent l'air à la hauteur de la dernière transversale et l'envoient aux fronts d'attaque, suivant le mode que nous connaissons. Le volume d'air débité était d'environ 0^m³,40 à la seconde. Ce système a été appliqué jusqu'au p. k. 3,100.

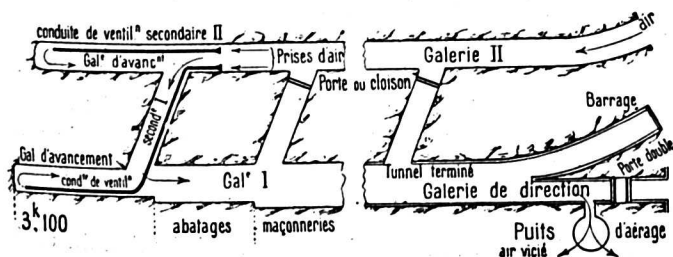


Fig. 34. — Deuxième période de la ventilation provisoire du côté de Brigue.

3^{me} période. — Du 1^{er} juin 1900 au 18 mars 1901 (fig. 35), l'air est refoulé dans la galerie parallèle par un ventilateur centrifuge provisoire de 1^m,80 de diamètre, comprenant 15 ailettes hélicoïdales et faisant 600 tours à la minute. Il est actionné par une turbine de 17 à 18 chev. des Ateliers de Vevey; une locomobile Sulzer de la même force est en réserve. Cette installation, très complète, est aménagée dans un petit bâtiment construit à l'entrée de la galerie II. L'air circule comme précédemment et s'échappe soit par le puits d'aérage, dans lequel on n'entretient plus de feu, soit par les ouvertures de la galerie I et de la galerie de direction. Le volume d'air obtenu: 15 m³ dès le début, est allé en diminuant en raison de l'allongement des galeries.

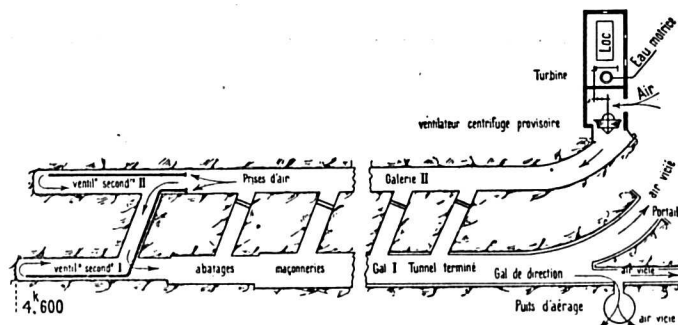


Fig. 35. — Troisième période de la ventilation provisoire du côté de Brigue.

Les fronts d'attaque sont alimentés comme précédemment. Ce système a été remplacé au p. k. 4,600 par la ventilation définitive.

Côté d'Iselle. — Avant la mise en service de la ventilation définitive on a assuré le renouvellement de l'air des chantiers, du côté d'Iselle, en employant deux ventilateurs centrifuges provisoires, placés dans le bâtiment des machines et actionnés par des machines à vapeur. Ils pouvaient donner chacun environ 2 m³ d'air par seconde, à la vitesse de 1200 tours par minute. La conduite était en tôle de 0,45 de diamètre en dehors du tunnel et de 0,25 dans les galeries. La ventilation secondaire a été établie dès le début, comme celle du côté de Brigue.

Phases de la ventilation définitive. — *1^{re} phase.* — Comme nous le savons, le 18 mars 1901 a été mise en service la ventilation définitive à Brigue. Elle a fonctionné, telle qu'elle est représentée fig. 36, jusqu'au 28 mai 1904, date à laquelle on a dû condamner les galeries d'avancement

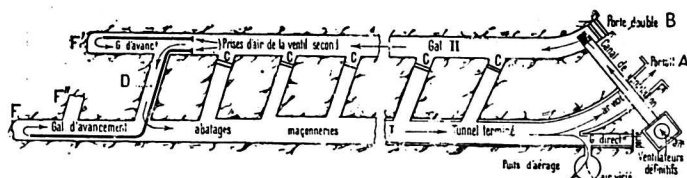


Fig. 36. — Première phase de la ventilation définitive du côté de Brigue.

et la transversale n° 52, au moyen de portes de sûreté, pour éviter l'inondation générale des chantiers par de fortes sources rencontrées au front d'attaque I. De ce fait la ventilation secondaire a été annulée.

2^{me} phase. — Une transversale supplémentaire n° 52 bis, perpendiculaire à l'axe du tunnel, a été percée au p. k. 10,104, pour permettre de ventiler les galeries I et II entre la transversale 51 et les portes de sûreté.

Cette ventilation (fig. 37) a duré jusqu'au 22 avril 1905, date à laquelle on a commencé à refouler l'air dans le tunnel I.

Elle a subi une variante après la rencontre des deux galeries d'avancement, soit du 9 mars au 22 avril, période pendant laquelle on a inversé la ventilation (l'air entre par le tunnel I et s'échappe par le ventilateur, toujours relié à la galerie II par le caisson provisoire). Cette inversion a eu pour but de permettre la construction d'un barrage avec porte provisoire en bois à l'entrée du tunnel I et le refoulement ultérieur de l'air dans ce tunnel.

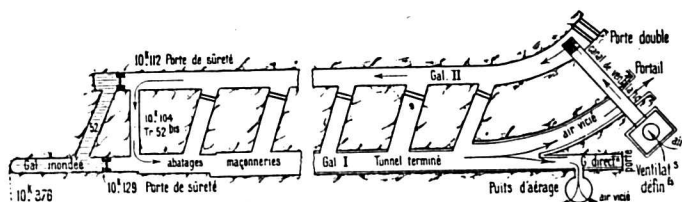


Fig. 37. — Deuxième phase de la ventilation définitive du côté de Brigue.

3^{me} phase. — On supprima ensuite le caisson provisoire et le refoulement se fit régulièrement dans le tunnel I; les portes de sûreté furent ouvertes et remplacées par des portes de service à claire-voie et à panneaux mobiles permettant de régler le passage de l'air. La circulation se fit alors comme le

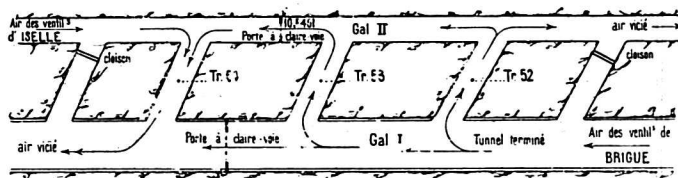


Fig. 38. — Troisième phase de la ventilation définitive du côté de Brigue.

montre la fig. 38, de manière à ventiler toutes les parties des galeries où restaient encore des travaux à exécuter.

4^{me} phase. — Plus tard, les portes de service furent enlevées, le barrage provisoire en bois à l'entrée du tunnel I fut remplacé par un rideau mobile en toile, qu'on lève seulement au passage des trains, et le courant définitif passa enfin de Brigue à Iselle, tous obstacles enlevés, à une vitesse supérieure à 3 m. à la seconde, capable de renouveler intégralement l'air du tunnel en moins de deux heures.

Réfrigération auxiliaire par l'eau froide, côté Brigue.

En novembre 1901, alors que le front d'attaque était arrivé, du côté de Brigue, au sixième kilomètre, la température du rocher s'élevait à 38° C. et s'accroissait dans une proportion anormale, dépassant sensiblement celle qu'on pouvait attendre du relief de la montagne. Le volume d'air refoulé dans le tunnel atteignait 29 m³ à la seconde, et malgré cette forte ventilation le thermomètre marquait 28° et 30° dans les différents chantiers en travail. La distance verticale séparant la galerie de la surface du sol ne mesurait cependant que 1100 m., soit la moitié seulement de l'épaisseur maxima qu'on devait atteindre au kilomètre 9.

En face d'une allure aussi peu rassurante de la courbe thermique, l'Entreprise prit des mesures pour installer et mettre en service sans aucun retard la réfrigération par l'eau froide, procédé qui avait été prévu et étudié dans tous ses détails pour le cas où la ventilation proprement dite deviendrait insuffisante.

Ce procédé consiste à refouler dans le tunnel une certaine quantité d'eau froide, dans une conduite spéciale isolée, puis à la diviser en très fines particules au moyen d'appareils pulvérisateurs placés près des chantiers en travail. Par son mélange intime avec l'air ou son contact avec le rocher, cette eau doit soutirer de la chaleur et servir ensuite de véhicule pour la conduire au dehors par le canal d'écoulement de la galerie parallèle.

Le 3 juin 1902, l'installation de la réfrigération du côté de Brigue était terminée et mise en service. Nous la décrivons sommairement.

Filtrage de l'eau. — L'eau employée au service de la réfrigération a été prise sur la conduite de l'eau motrice du Rhône par un branchement muni d'une vanne. Malgré son séjour dans un bassin de décantation à Mörel et son passage à travers plusieurs grilles, cette eau était trouble en été et il était nécessaire de la clarifier pour éviter l'usure rapide des pompes et des pulvérisateurs. Cette clarification s'est faite dans un filtre dit à *cellules*, établi dans un bâtiment spécial près de la tête du tunnel. Le filtrage s'opère au travers de panneaux en toile métallique, à 350 mailles par centimètre carré, dans des compartiments, au nombre de 60, disposés de manière à pouvoir être nettoyés successivement sans gêner le fonctionnement des compartiments voisins. La surface filtrante totale, de 120 m², peut débiter environ 80 litres par seconde, à condition que les toiles soient maintenues propres. L'accès de l'eau trouble est réglé au moyen d'une vanne à levier et contrepoids commandée par un flotteur, qui règle ainsi la hauteur d'admission et rend impossible l'inondation du filtre et par suite le mélange des eaux troubles et filtrées. Du filtre, l'eau se rend par une conduite en ciment dans le puisard des pompes.

Pompes. — Pour refouler l'eau dans le tunnel, on a installé dans la grande salle des machines un groupe de deux pompes centrifuges à haute pression du système Sulzer, de Winterthur, montées de manière à pouvoir marcher séparément, l'une servant de réserve à l'autre, ou accouplées en pression. Dans le premier cas, chaque pompe peut débiter 80 litres par seconde à la pression de 22,5 atmosphères pour un nombre de tours de 1100 à la minute. Dans le second cas, la même quantité d'eau est portée à la pression double, soit à 45 atmosphères.

Ces pompes sont accouplées directement à des turbines Rieter de 300 HP chacune, consommant 670 litres d'eau par seconde à une pression de 4,5 atmosphères.

Conduites. — Pour conduire l'eau de la salle des pompes aux appareils de pulvérisation dans le tunnel, on a établi une conduite de 253 mm. de diamètre intérieur, en tôle d'acier de 7 mm. d'épaisseur. Supportée par des chevalets, elle traverse une partie de la cour des installations puis entre dans la galerie parallèle. Elle longe le côté Furka de cette dernière, reposant sur des appuis maçonnés ou des consoles en fer et contourne l'ouverture des transversales affectées au passage des trains de service. Les joints sont à brides et boulons, avec rondelles en caoutchouc. Des joints spéciaux de dilatation sont établis en nombre suffisant.

Afin d'éviter autant que possible l'élévation de la température de l'eau pendant le trajet, on a enveloppé cette conduite sur toute sa longueur d'une couche isolante de 66 millimètres d'épaisseur de charbon de bois broyé en menus fragments. Cette matière est maintenue et protégée par une enveloppe cylindrique en tôle galvanisée de 0^m,40 de diamètre. L'introduction du charbon entre la conduite et l'enveloppe s'est faite par des ouvertures rectangulaires, dont le couvercle fut soudé après le remplissage.

Les branchements secondaires pour la distribution de l'eau, entre la conduite principale et les appareils d'asper-

sion, sont en tuyaux de 100 mm. de diamètre. Ces derniers, d'une faible longueur et souvent déplacés, n'ont pas été munis d'enveloppe isolante.

Appareils de pulvérisation. — Pour diviser l'eau en fines gouttelettes et projeter celles-ci en tous sens dans la section libre des galeries, de manière à établir une très grande surface de contact entre elles et l'air qu'il s'agit de rafraîchir, sans dépenser une quantité d'eau supérieure à celle strictement nécessaire, on s'est servi de pulvérisateurs (*Düse*) Westfalia provenant de l'« *Armaturen-Fabrik Westfalia* », de Gelsenkirchen (Westphalie). Comme le montre la figure 39, ce pulvérisateur consiste en une sorte de lance en cuivre, dans laquelle l'eau, dirigée par des ailettes en spirale, prend un mouvement rapide de rotation, avant d'effectuer sa sortie par un trou de 3 mm. de diamètre, avec une vitesse de 70 m. à la seconde environ. L'eau prend, en sortant, des directions diverses résultant des forces variables aux-

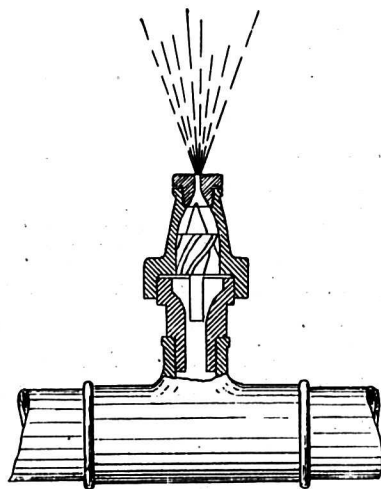


Fig. 39. — Petit pulvérisateur (*Düse*).
Mod. Westfalia de Gelsenkirchen (Westphalie).

quelles elle était soumise dans la lance, et il en résulte qu'à une distance de un mètre ou deux de l'orifice, les gouttelettes divergent considérablement en formant une véritable gerbe d'eau pulvérisée. Le courant d'air fait au surplus dévier ces gerbes et les allonge dans le sens de la ventilation.

M. Peter, ingénieur des Ateliers de l'Entreprise du tunnel, a construit à Brigue un autre pulvérisateur basé sur le principe du précédent, mais qui en diffère sensiblement par l'adjonction d'un deuxième espace hélicoïdal donnant une gerbe périphérique venant s'ajouter à la pulvérisation centrale. Cet appareil, représenté figures 40 et 41, est très puissant et aurait un meilleur rendement que la « *Westfalia Düse* » d'après des essais comparatifs qui ont été faits dans la mine Schamrok, à Gelsenkirchen.

Les deux systèmes ont été employés au Simplon, où ils ont eu d'ailleurs des applications différentes.

Le pulvérisateur Westfalia a été disposé par groupes de 21 jets, placés en quinconce, occupant une longueur de 10 m. de galerie; deux de ces groupes étaient souvent juxtaposés pour former un rideau d'eau pulvérisée de 20^m,50

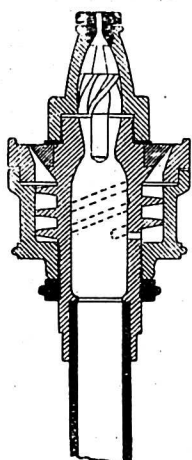


Fig. 40. — Coupe du grand pulvérisateur, mod. Peter, dit pulvérisateur universel.

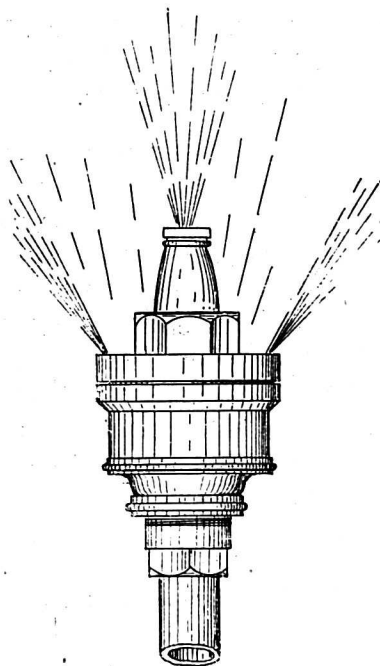


Fig. 41.
Vue du grand pulvérisateur Peter.

de longueur. Les figures 42-43 montrent en plan et en coupe la disposition de cet assemblage, tel qu'il fonctionnait en avant des chantiers d'élargissement. Des tamis en forme de jalousies (fig. 44), placés à 4 m. en arrière des derniers jets, servent à abattre les gouttelettes d'eau entraînées par le courant.

La vue photographique (fig. 45), prise dans le tunnel par M. l'ingénieur Weinholz, montre un de ces appareils en fonctionnement.

Cette disposition présentait l'inconvénient d'interrompre la circulation dans le parcours compris entre les deux transversales voisines. Toutefois, la gêne qui en résultait n'était pas très grande, attendu que les wagonnets de l'avancement, les seuls qui allaient au delà de l'appareil, pouvaient passer par la galerie parallèle.

Un autre appareil de réfrigération (fig. 46-47) a aussi été employé. C'est un groupement, sur un truc de wagonnet, de douze injecteurs du genre de ceux de la ventilation secondaire, lançant un jet dans autant de tubes horizontaux de

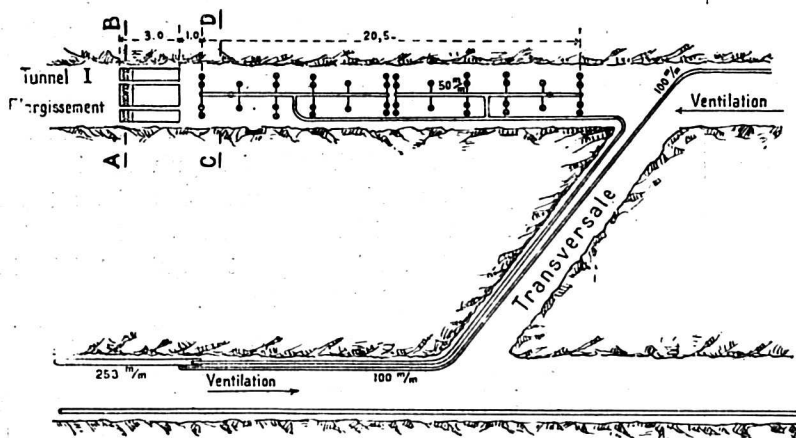


Fig. 42. — Groupe de 42 pulvérisateurs Westfalia placés en avant des chantiers d'élargissement du côté de Brigue.

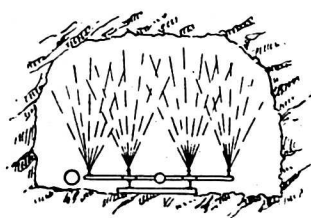


Fig. 43. — Coupe C, D de l'appareil à 42 pulvérisateurs.

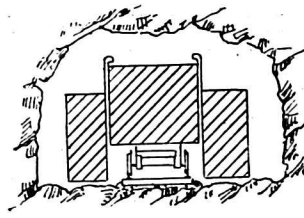


Fig. 44. — Coupe A, B montrant les jalousies pour l'assèchement de l'air.

0^m,30 de diamètre et 2^m,75 de longueur. Placé sur voie, à l'intersection d'une transversale et de la galerie I, de manière à ne pas gêner la circulation dans cette dernière galerie, l'appareil se trouve placé obliquement par rapport au courant. Par l'aspiration produite, l'air est appelé et passe dans les tubes où il subit un abaissement de température. L'eau n'est pas très bien utilisée, parce qu'elle ne prend aucun contact avec le rocher.

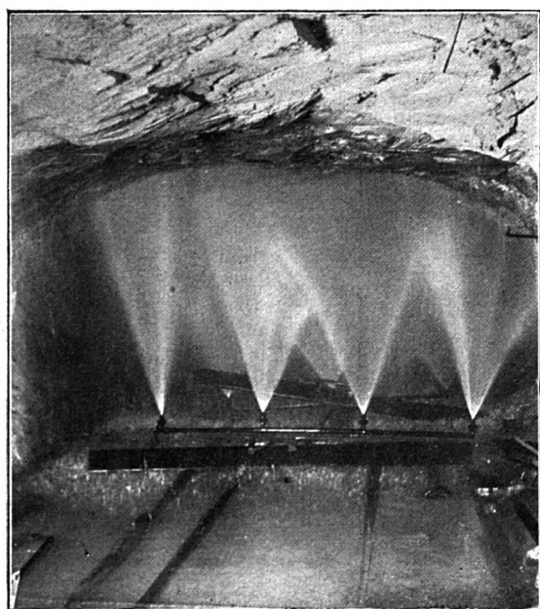
On a employé, concurremment avec ce dernier appareil, le groupe de pulvérisateurs de la fig. 45, légèrement modifié, de manière à pouvoir le placer sur un côté de la galerie (fig. 48) et éviter l'interruption de la circulation par wagons. Un gardien fermait la vanne au moment des passages et les tamis à jalousies étaient supprimés, ce qui n'avait pas d'inconvénient lorsqu'on pouvait disposer d'une cinquantaine de mètres entre l'appareil et le chantier le plus rapproché.

Les appareils à pulvérisation ne pouvaient trouver leur application dans la galerie d'avancement, à cause de l'active circulation qui y règne, aussi a-t-on cherché à éviter le réchauffement de l'air sur ce parcours, en aspergeant le rocher avec de l'eau froide. On a employé dans ce but des tuyaux en acier de 5 cm. de diamètre, longeant la paroi des dites galeries et percés tous les 30 cm. de petits trous de 3 mm. de diamètre, dirigés contre le rocher. L'eau aspergeait en même temps le rocher et la conduite de la ventilation secondaire.

Le tableau suivant résume les conditions dans lesquelles a fonctionné le service de l'alimentation des appareils réfrigérants du côté de Brigue.

La température initiale de l'eau était prise trois fois par jour, en sorte que les chiffres du tableau y relatifs représentent assez bien la moyenne, tandis que la température de l'eau aux lieux d'emploi était relevée beaucoup plus rarement. Il était d'ailleurs possible de lire dans le tunnel une température trop élevée, notamment quand l'eau avait stationné plus ou moins longtemps dans les branchements par suite d'arrêt des appareils. En outre, la température de l'eau allant aux perforatrices était généralement plus élevée que celle de la réfrigération, à cause de la forte réduction de débit pendant le marinage et du petit calibre des conduites de la haute pression (0^m,10 et 0^m,12), et il était parfois assez facile de confondre ces deux eaux dans des branchements de même diamètre. Aussi avons-nous relevé nous-même, à différentes reprises, la

| Dates Trimestres | Nombre de tours des pompes cen- triges par minute | Pression de l'eau à l'ori- gine de la conduite atmosph. | Volume d'eau refoulé dans le tunnel litres-sec. | Température de l'eau au filtre moyenne | Température de l'eau à la sortie des pulvérisateurs dans le tunnel moyenne | Longueur de la conduite isolée | Observations |
|---------------------|---|---|--|---|---|--------------------------------------|--|
| 1902 II | — | — | 32 | — | — | mètres 5500 | <p>La pression de l'eau aux appareils a varié de 12 à 15 atmosphères.</p> <p>A partir du 3^e trimestre 1903, et jusqu'à la fin des travaux, les pompes centrifuges ont marché <i>en série</i>.</p> |
| III | 1150 | 22 | 50 | 8°,7 | 12°,— | 7300 | |
| IV | 1066 | 21 | 55 | 1,9 | 5—9° | 8000 | |
| 1903 I | 1040 | 20,5 | 50 | 4,9 | 6—11° | 8500 | |
| II | 1030 | 20 | 60 | 8,2 | 11—15° | 9050 | |
| III | 875 | 27,5 | 48 | 7,4 | 12—15° | 9163 | |
| IV | 960 | 30 | 79 | 2,7 | 8—10° | 9163 | |
| 1904 I | 1003 | 34 | 65 | 5,9 | 10—12° | 10400 | |
| II | 950 | 25,2 | 73 | 7,8 | 11—15°,5 | 10420 | |
| III | 964 | 25 | 75 | 7,7 | 15° | 10420 | |
| IV | 955 | 28 | 69 | 2,2 | 6—10° | 10420 | |
| 1905 I | 934 | 28 | 63 | 3,9 | 11°,5 | 10420 | |
| II | 835 | 26 | 62 | 7,1 | 17°,— | 10420 | |
| III | 890 | 24 | 24 | 8,5 | 14—17° | 10420 | |
| IV | — | — | 13 | 0,5 | 14° | 10420 | |



Photographie Weinholz.

Fig. 45. — Vue photographique montrant le fonctionnement d'un appareil à 42 pulvérisateurs dans la galerie de base du tunnel I, côté Brigue.

température de ces eaux et nous avons constaté en définitive que la température de l'eau de réfrigération pouvait varier aux appareils de 5° à 17° suivant la saison, la vitesse de l'eau dans les conduites, la longueur de ces dernières et la température de l'ambiance qui a subi, non seulement dans la partie centrale du tunnel, mais encore dans toute la galerie parallèle, des variations très importantes, surtout pendant la période du déversement des eaux chaudes provenant du versant italien.

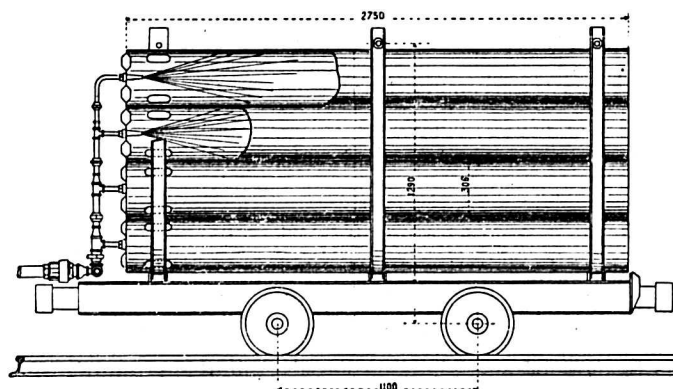


Fig. 46 — Appareil de réfrigération formé de 12 injecteurs montés sur un truc de wagonnet. Vue longitudinale.

Il résulte naturellement de ces faits que l'action réfrigérante des pulvérisateurs a subi des variations assez notables.

Quant à l'action protectrice de l'isolant, on peut l'apprécier d'après le cas suivant observé pendant l'hiver 1903-04 : l'eau ayant aux pompes une température de 1°,5 a subi un échauffement de 4° après un parcours de 10 km., ayant duré deux heures approximativement, dans un milieu dont la température variait de 10 à 30°, avec une moyenne de 23°,5.

Répartition des appareils. — Pendant la marche normale des travaux, les appareils réfrigérants ont été distribués de la manière suivante dans les diverses galeries :

1° Un groupe de pulvérisateurs Westfalia, placé dans le caisson provisoire entre les ventilateurs et la galerie parallèle, fonctionnait pendant les grandes chaleurs pour éviter l'introduction d'air chaud dans le tunnel. En ce point l'eau de pulvérisation était toujours à une basse température et entretenait les parois du canal dans un état de frai-

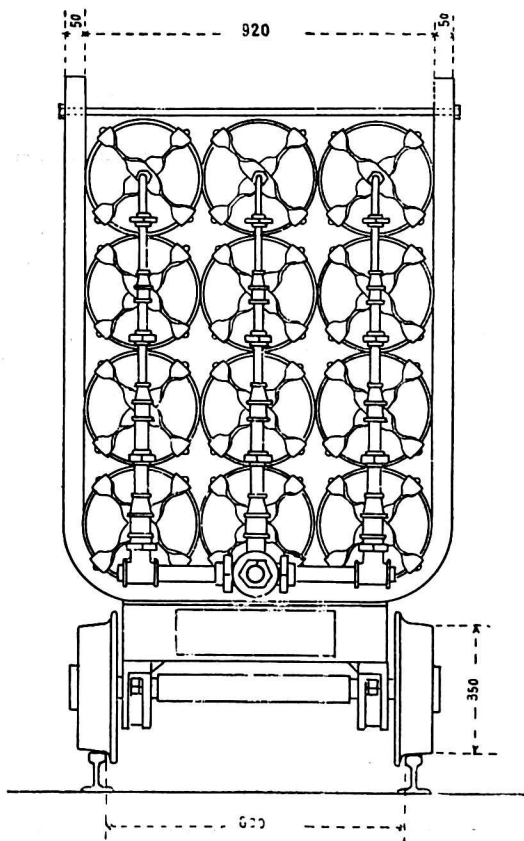


Fig. 47. — Appareil de réfrigération forme de 12 injecteurs montés sur un truc de wagonnet. Vue transversale.

cheur satisfaisant, même pendant les heures les plus chaudes des journées d'été.

2° Un ou deux grands pulvérisateurs Peter fonctionnaient dans les parties chaudes de la galerie parallèle, entre le portail et la transversale conduisant à la gare du tunnel. Les gardiens des locaux de service et les agents du bureau de la gare bénéficiaient de l'abaissement de température produit par ces appareils, mais les hommes de service ayant à circuler dans la galerie parallèle devaient se munir de vêtements imperméables pour traverser les zones arrosées.

3° Des tubes percés, aspergeant la paroi du rocher, étaient établis dans la galerie parallèle, quelques mètres avant la dernière transversale ouverte. Cette disposition, qui ne gênait en rien la circulation, avait pour effet de rafraîchir l'air au moment de son admission dans les tubes de la ventilation secondaire et de son passage dans la galerie de base du tunnel I.

4° Des tubes d'aspersion du même modèle étaient disposés contre la paroi des galeries d'avancement I et II en nombre variable suivant la longueur de ces galeries et la température de la roche. On avait soin de les placer du même côté que la conduite de la ventilation secondaire, de sorte que les éclaboussures d'eau froide rejaillissaient sur cette dernière et la maintenaient à une température bien inférieure à celle du milieu.

5° Un groupe de pulvérisateurs Westfalia, composé de 21 ou 42 jets, était placé dans la galerie de base du tunnel I avant les chantiers de galerie de faite et d'abatages.

6° Un appareil à 12 injecteurs sur wagonnet, placé en avant des chantiers de maçonnerie à l'intersection d'une transversale et de la galerie de base du tunnel I, ou un groupe de pulvérisateurs Westfalia placé contre une paroi de la galerie de base.

7° Deux groupes de deux grands pulvérisateurs Peter, placés dans la partie du tunnel terminé affectée aux manœuvres des trains (point terminus des trains à vapeur venant de l'extérieur et point de départ des trains à air comprimé allant aux chantiers de maçonnerie, d'élargissement et d'avancement). Ces pulvérisateurs étaient montés sur une traverse en bois calée à la naissance de la voûte pour ne pas gêner la circulation des trains. Des auvents, en tôle ondulée, placés contre les piédroits, garantissaient de la pluie le passage des piétons. Un gardien était en outre spécialement chargé de fermer les appareils au moment du passage des trains.

Tous ces appareils réfrigérants étaient, cela va de soi, déplacés à mesure de l'avancement du travail ; leur répartition a subi aussi de nombreuses modifications, suivant les cas particuliers qui se sont présentés et dans le détail desquels nous ne pouvons entrer.

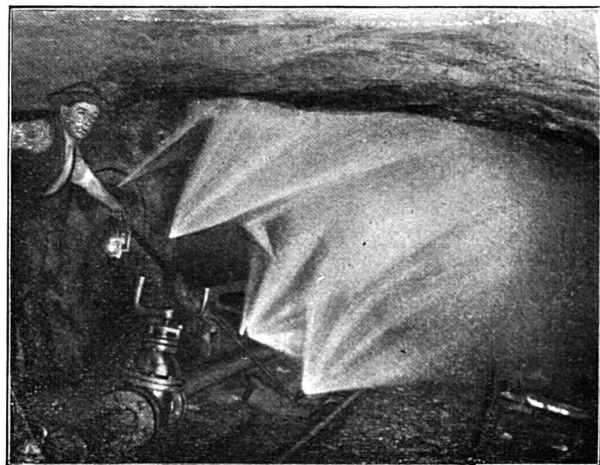


Fig. 48. — Appareil réfrigérant placé sur un côté de la galerie de base du tunnel I, pour ne pas intercepter la voie.

Effet utile de la réfrigération. — Les abaissements de température obtenus par la réfrigération ont été d'autant plus sensibles que la différence de température des éléments mis en présence a été plus grande. Nous donnons, à titre d'indication générale, les résultats de quelques expériences faites avec soin en vue de se rendre compte des quantités de chaleur enlevées dans la zone où la température du rocher a atteint ou dépassé 50°.

A. Réfrigération de la galerie d'avancement I.

Le 24 décembre 1902, le front d'attaque étant à 8430 m. du portail, la température du rocher étant de 53°,8, c'est-à-dire voisine de la plus élevée, notre expérience a porté sur les 54 derniers mètres de la galerie d'avancement I. Les appareils productifs de froid qui fonctionnaient sur cette longueur étaient les suivants :

1^o Ventilation secondaire : Conduite de 0^m,40 de diamètre portant à son extrémité terminale une buse de 0^m,30 de diamètre lâchant l'air frais à 8 m. en arrière du front de taille.

2^o Un tube d'aspersion ayant une longueur perforée de 10 m., aboutissant à 29 m. en arrière du front de taille, asperge avec de l'eau fraîche une paroi de la galerie et la conduite de ventilation secondaire.

3^o La conduite d'eau de la haute pression actionnant les perforatrices.

Au profil du p. k. 8,376 (8,430-54), nous avons fait les constatations suivantes :

a/ Eléments introduits dans la section considérée :

Volume d'air amené en une seconde par la conduite de ventilation 0,94 m³

Température de cet air, rafraîchie par le réservoir à glace placé quelques mètres en arrière de notre station d'observation 5^o,8

Quantité d'eau débitée par seconde par le tube percé 4,2 l.

Température de cette eau 6^o,—

Quantité d'eau débitée par seconde pour les perforatrices 5,4 l.

Température de cette eau 8^o,5

Température moyenne de l'eau introduite :

$$\frac{4,2 \times 6 + 5,4 \times 8,5}{4,2 + 5,4} = \dots\dots\dots 7^{\circ},4$$

Humidité relative de l'air 98 %

b/ Eléments sortant de la section :

Volume d'air à la seconde 0,94 m³

Température de cet air :

Pendant la perforation 19^o,—

» le marinage 20^o,—

Volume d'eau à la seconde :

Pendant la perforation 9,6 l.

» le marinage 4,2 l.

Température de cette eau :

Pendant la perforation 12^o,—

» le marinage 11^o,5

La quantité de chaleur soustraite au milieu a donc été la suivante, le poids de 1 m³ d'air étant de 1,1 kg. et la chaleur spécifique de l'air (à pression constante) étant égale à 0,237 :

Pendant la perforation :

a/ Chaleur emportée par l'air :

$$0,237 \times 0,94 \times 1,1 \times (19 - 5,8) \dots\dots\dots 3,24 \text{ calories}$$

b/ Chaleur emportée par l'eau :

$$9,6 (12 - 7,4) \dots\dots\dots 44,16 \text{ »}$$

Total par seconde 47,40 calories

ce qui donne par heure et par mètre carré de paroi de rocher une *moyenne* de $\frac{47,4 \times 3600}{540} \dots\dots\dots 316 \text{ calories.}$

Pendant le marinage :

a/ Chaleur emportée par l'air :

$$0,237 \times 0,94 \times 1,1 (20 - 5,8) \dots\dots\dots 3,48 \text{ calories}$$

b/ Chaleur emportée par l'eau :

$$4,2 (11,5 - 6) \dots\dots\dots 23,10 \text{ »}$$

Total par seconde 26,58 calories

soit par heure et par mètre carré de rocher une *moyenne*

$$\text{de } \frac{26,58 \times 3600}{540} = \dots\dots\dots 177,2 \text{ calories.}$$

B. Réfrigération de l'ensemble des chantiers d'avancement, d'abatages et de maçonneries.

Le 29 décembre 1902, une expérience s'étendant sur l'ensemble des chantiers en activité a donné les résultats suivants :

Le front d'attaque de la galerie I était au p. k. 8462 m.

Le front d'attaque de la galerie II était au p. k. 8300 m.

La température du rocher à l'avancement était de 53^o

Le profil d'observation était au p. k. 7280 m.

soit à 1182 m. en arrière de l'avancement, dans la partie du tunnel venant d'être terminée. Il n'y avait que des venues d'eau négligeables sur le parcours considéré.

Pour l'ensemble des chantiers, étaient en fonctionnement : un grand pulvérisateur au p. k. 7,670 de la galerie parallèle, deux tubes percés de 5 m. dans la galerie d'avancement II, trois tubes semblables dans la galerie d'avancement I, un groupe de pulvérisateurs à 42 jets au p. k. 7,900 (chantiers d'abatages), un groupe de pulvérisateurs à 16 jets au p. k. 7,500 (chantiers de maçonnerie).

Les constatations suivantes ont été faites au p. k. 7280 :

a/ Eléments introduits :

Volume d'air passant par seconde, mesuré dans la galerie parallèle 24,65 m³

Température de cet air 20^o,5

Humidité relative 98 %

Volume d'eau passant par seconde dans la conduite de réfrigération 43 l.

Température de cette eau 5^o,—

Volume d'eau passant par seconde dans les conduites des perforatrices 17 l.

Température de cette eau 8^o,—

Température moyenne des eaux introduites :

$$\frac{43 \times 5 + 17 \times 8}{43 + 17} = \dots\dots\dots 5^{\circ},85$$

b/ Eléments sortants :

Volume d'air à la seconde 24,65 m³

Température de cet air dans le tunnel I 19^o,—

Humidité de cet air 98 %

Volume d'eau évacuée par seconde 60 l.

Température de cette eau 13^o,5

Quantité de chaleur enlevée par l'eau en une seconde : 60 (13,5 — 5,85) 459 calories.

| Désignation de l'appareil | Eau de réfrigération | | | Air traversant l'appareil | | | Observations |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---|
| | Volume consommé en lit. p. sec. | Température à la sortie de l'appareil | Pression à l'appareil en atmosph. | Volume en m ³ par sec. | Vitesse en m. p. sec. | Abaissement de la température | |
| Groupe de 42 petits pulvérisateurs verticaux placés en quinconce. . . . | 21 | 7° | 14 | 22,5 | 4,— | 9°,5 | Dans la galerie de base du tunnel I. |
| Groupe de 12 injecteurs horizontaux montés sur wagonnet | 6 | 7° | 14 | — | — | 3°,— | A l'intersection d'une transversale et de la galerie de base du tunnel I. |
| Un grand pulvérisateur . | 3,6 | 6° | 15 | 27,5 | 3,5 | 4°,— | Dans la galerie parallèle. |
| Groupe de 2 grands pulvérisateurs. | 7,2 | 6° | 15 | 27,5 | 1,10 | 3°,— | Dans la partie supérieure de la section terminée du tunnel. |
| Tube de 0 ^m ,05 de diamètre percé de 16 trous distants de 0 ^m ,30 | 2,1 | 5° | 12 | 20 | 3,— | 2°,5 | Dans la galerie parallèle. |

L'air sortant du profil, à une température inférieure de 1°,5 à sa température d'entrée, a cédé à l'eau de réfrigération une quantité de chaleur égale à $0,237 \times 24,65 \times 1,1 \times 1,5 = 9,6$ calories par seconde.

Cette chaleur, comprise dans les 459 calories ci-dessus, doit en être retranchée pour avoir celle abandonnée par le rocher. Cette dernière est donc égale à $459 - 9,6 = 449,4$ calories par seconde ou $\frac{449,4 \times 3600}{29000} = 55,8$ calories, en moyenne, par heure et par mètre carré de paroi de rocher. Nous ajoutons que la température primitive du rocher a été supérieure à 50° sur toute la section considérée.

C. Réfrigération de l'ensemble des galeries exécutées à fin décembre 1902.

En faisant des observations analogues aux précédentes à l'entrée de la galerie parallèle et à la sortie du tunnel I, on a calculé, à la fin du mois de décembre 1902, que la chaleur totale enlevée de l'ensemble des galeries exécutées à cette date s'élevait à 650 calories par seconde, en nombre rond. Mais dans ce calcul on n'a pas tenu compte de la chaleur emportée du fait de la vaporisation de l'eau dans le tunnel par la ventilation. Or, l'air entrant avec une teneur approximative de 10 grammes de vapeur d'eau par mètre cube d'air et il en ressortait avec 20 grammes environ.

La chaleur de vaporisation de l'eau (chaleur totale) pouvant être prise égale à 600, la chaleur enlevée par la vaporisation doit être évaluée, pour une ventilation de 30 m³ à la seconde à $30 \times 0,010 \times 600 = 180$ calories. C'est donc en réalité un total de $650 + 180 = 830$ cal. par seconde qu'on enlevait à cette date de l'ensemble des galeries.

Abaissements de température obtenus par les différents appareils. — Les divers types d'appareils, observés séparément, ont produit les abaissements de température indiqués au tableau ci-dessus, d'après quelques observations faites en 1902 et 1903.

Il n'était pas facile, avec les thermomètres dont nous disposions, de prendre exactement la température de l'air après les pulvérisateurs. Si on se plaçait trop près de ces derniers, le thermomètre se couvrait de fines gouttelettes d'eau ou de buée et donnait une température trop basse. Plus loin, on s'exposait à noter une température trop élevée, car l'air se réchauffait sur un faible parcours. Les chiffres du tableau représentent des moyennes approximatives, faites en excluant un certain nombre de lectures apparemment entachées d'erreurs.

Réfrigération du côté d'Iselle.

L'abaissement considérable de la température du rocher (fig. 53) dû au cours d'eau souterrain, dont les travaux de percement du côté d'Iselle ont saigné divers canaux entre les p. k. 15,384 et 15,944 (p. k. 3,860 et 4,420 à partir du portail d'Iselle), abaissement qui s'est fait nettement sentir dans une zone s'étendant entre les p. k. 14 et 17, a permis d'espérer un moment qu'on pourrait pousser les chantiers d'Iselle jusqu'à leur rencontre avec ceux de Brigue, sans faire usage de la réfrigération auxiliaire par l'eau froide.

En effet, l'air de la ventilation, en contact intime sur un parcours de 4 à 5 kilomètres, avec l'eau froide de ce cours d'eau dévalant par la galerie parallèle, arrivait aux différents chantiers avec une température bien inférieure à celle des chantiers du côté de Brigue. Toutefois, comme il fallait nécessairement prévoir un changement d'allure de la courbe thermique du rocher pour qu'elle pût se raccorder avec celle, si élevée, du côté de Brigue, comme il fallait en outre s'apprêter à recevoir, après le percement, les eaux chaudes des sources coupées par l'attaque de Brigue au delà du point culminant, on prit la résolution d'utiliser, le cas échéant, comme eau de réfrigération à conduire aux chantiers, celle de la grande source froide (12° C.) mise à jour dans la transversale n° 21 a au p. k. 4,400.

Cette solution permettait d'économiser une longueur de 5 kilomètres environ de conduite de 0^m,253 et de diminuer de 6 à 7 atmosphères la pression d'origine. De plus, comme la source sortait avec une grande violence d'une fissure de rocher, on eut aussi l'idée de se servir de sa pression naturelle pour refouler l'eau aux chantiers à rafraîchir.

La pression qu'il était nécessaire de produire au p. k. 4,400 pour cet objet pouvait s'évaluer à un minimum de 10 à 11 atmosphères afin d'avoir encore aux derniers appareils réfrigérants une disponibilité de 6 atmosphères, suffisante pour produire une bonne pulvérisation. On capta donc la source dans une conduite en l'entourant d'un fort massif en maçonnerie et on obtint de la sorte une pression naturelle de 6 atmosphères.

Pour remonter cette pression (qui diminuait d'ailleurs progressivement) on intercala sur la conduite au droit de la traverse 23 (p. k. 4,720 d'Iselle) une pompe centrifuge Sulzer, actionnée par une turbine Pelton, prenant sa force sur les deux conduites de la haute pression des perforatrices. On installa de même, dans cette transversale agrandie en conséquence, une locomobile qui, en travaillant avec la condensation, pouvait fournir 120 HP. Cette machine devait venir en aide à la turbine quand l'eau de la haute pression serait réclamée par la perforation.

Toute cette installation ne fut prête à fonctionner qu'en septembre 1904. Le 6 du même mois, une forte source chaude (70 l.-s. à 45°,4) ayant jailli de l'avancement, il devint impossible de continuer les travaux sans le secours de l'eau froide. On se hâta et l'on put mettre en service six jours après la réfrigération. L'eau avait une température de 14°,5 au p. k. 4,700 et 19° au p. k. 9,000; la pression était de 5 à 6 atmosphères aux appareils de pulvérisation.

Fin décembre 1904, les appareils réfrigérants étaient répartis comme suit. Tunnel I: p. k. 7,580, 8,615 et 8,730. Des tubes percés aspergeaient les galeries d'avancement, ainsi que les conduites de la ventilation secondaire. Dans le tunnel II, un pulvérisateur fonctionnait au p. k. 9,150. Depuis ce moment, l'avancement fut encore interrompu par différentes venues d'eau chaude; la turbine utilisait l'eau de la haute pression pendant ces interruptions et la

locomobile put être retirée après la rencontre des galeries Nord et Sud.

Les appareils de pulvérisation, quelque peu improvisés, étaient inférieurs comme rendement à ceux employés à Brigue. Nous représentons un de ces appareils (fig. 49).

La rencontre des galeries ayant eu lieu au p. k. 9,353, le 24 février 1906, et la réfrigération n'ayant commencé à fonctionner qu'au p. k. 9,110, cette dernière n'a donc été nécessaire que sur le parcours très limité de 243 mètres. Mais il a fallu environ six mois pour perforer ce tronçon.

Réfrigération pendant l'exploitation.

La haute température, combattue d'une manière efficace, pendant les travaux de construction par la ventilation et les appareils réfrigérants que nous venons d'examiner, pourrait-elle être suffisamment abaissée pendant l'exploitation du tunnel par l'effet de la seule ventilation? Telle est la question qui se posa vers la fin de la campagne des travaux.

La ventilation, à la vérité, pouvait être fortement augmentée eu égard au faible frottement de l'air contre les parois revêtues du tunnel terminé, mais, en revanche, il y avait à prévoir, dans le calcul de la quantité de chaleur à soustraire celle introduite dans le tunnel par les locomotives des trains de l'exploitation. Tout compte fait, une Commission spécialement chargée de s'occuper de cette question conclut à la nécessité d'installer à titre définitif la réfrigération auxiliaire par l'eau froide, et fixa la capacité de cette installation à 40 ou 50 litres par seconde.

Les appareils suivants furent donc installés pour l'exploitation du tunnel :

1° Quatre groupes de petits pulvérisateurs Westfalia, comprenant chacun six jets distants de 2 m., placés à 3 m. au-dessus de la voie et dirigés contre la voûte, ont été placés du côté droit aux p. k. 8,680, 8,850, 9,480 et 9,680, suivant disposition représentée fig. 51 et 52;

2° Trois tubes d'aspersion de parois de 200 m. de longueur chacun (fig. 50) régnant contre les deux piédroits, à 3 m. de hauteur, furent répartis entre les p. k. 8,211 à 8,411, 9,836 à 10,036, 10,039 à 10,239, permettant de rafraîchir 3600 m² de parois chaudes.

Ces divers appareils sont alimentés par la conduite isolée de 0^m,253 et les pompes centrifuges ayant servi pendant la construction.

La traction électrique des trains à la traversée du tunnel ayant été appliquée sur ces entrefaites, l'utilité de ces appareils réfrigérants a été sensiblement diminuée; aussi, en pratique, ne fait-on fonctionner que les tubes d'aspersion, et cela suffit à maintenir l'air du tunnel à une température qui ne dépasse nulle part 27 à 28° (fig. 53), d'après un relevé du 28 avril 1907, qui nous a été communiqué par M. Fonjallaz, ingénieur, chargé de l'entretien du Tunnel du Simplon. Dans les parties où le rocher avait primitivement une température supérieure à 50°, la température de l'air est actuellement de 20 à 22°. Elle s'y abaisse même en un point à 18° sous l'action combinée de la grande ventilation et des

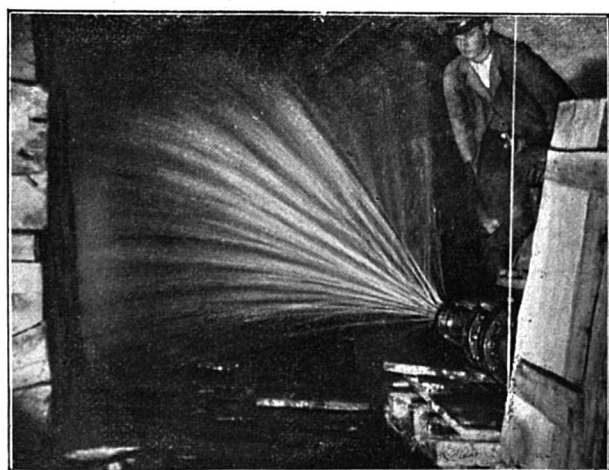


Fig. 49. — Appareil de pulvérisation employé du côté d'Iselle.

Installation de la réfrigération du tunnel par l'eau froide pendant l'exploitation.

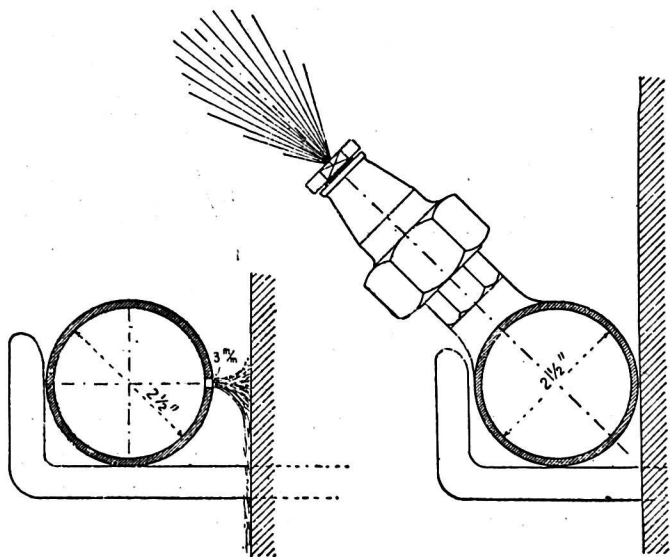


Fig. 50. — Tuyau percé aspergeant les piédroits du tunnel.

Fig. 51. — Pulvérisateur lançant une gerbe d'eau dans la direction de la voûte du tunnel.

appareils réfrigérants. La température plus élevée de l'air qu'on remarque du côté d'Iselle, précisément où la température du rocher était très basse, est due au sens de la ven-

tilation qui va de Brigue à Iselle. L'air absorbe de la chaleur pendant son trajet et sa température monte, vu sa faible chaleur spécifique. Mais le refroidissement du rocher ne faisant que s'accroître, sous l'effet de la puissante ventilation qui fonctionne en permanence, cette courbe de température s'abaissera progressivement encore avec le temps.

Avantages de la réfrigération par l'eau froide.

Pour combattre les hautes températures souterraines dans la construction des tunnels de très grande longueur, l'expérience du Simplon a montré que l'emploi de l'eau froide présentait des avantages incontestables. L'envoi, dans les galeries, d'un fort volume d'air est évidemment d'une grande valeur; c'est une condition indispensable pour entretenir la composition normale de l'élément respirable, mais ce n'est pas tout; il faut encore que cet air, tout en restant pur, ne s'échauffe pas au delà de 30 à 32° si l'on veut que le travail ne devienne pas extrêmement pénible et très coûteux. Or, lorsque les parois du rocher atteignent, comme au Simplon, une température de 50 à 54°, l'air en contact s'échauffe rapidement au-dessus de 30°, même quand sa vitesse atteint le maximum admissible.

Le refroidissement de l'air par l'air ne peut donc suffire que jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle il est nécessaire de faire intervenir un autre élément de réfrigéra-

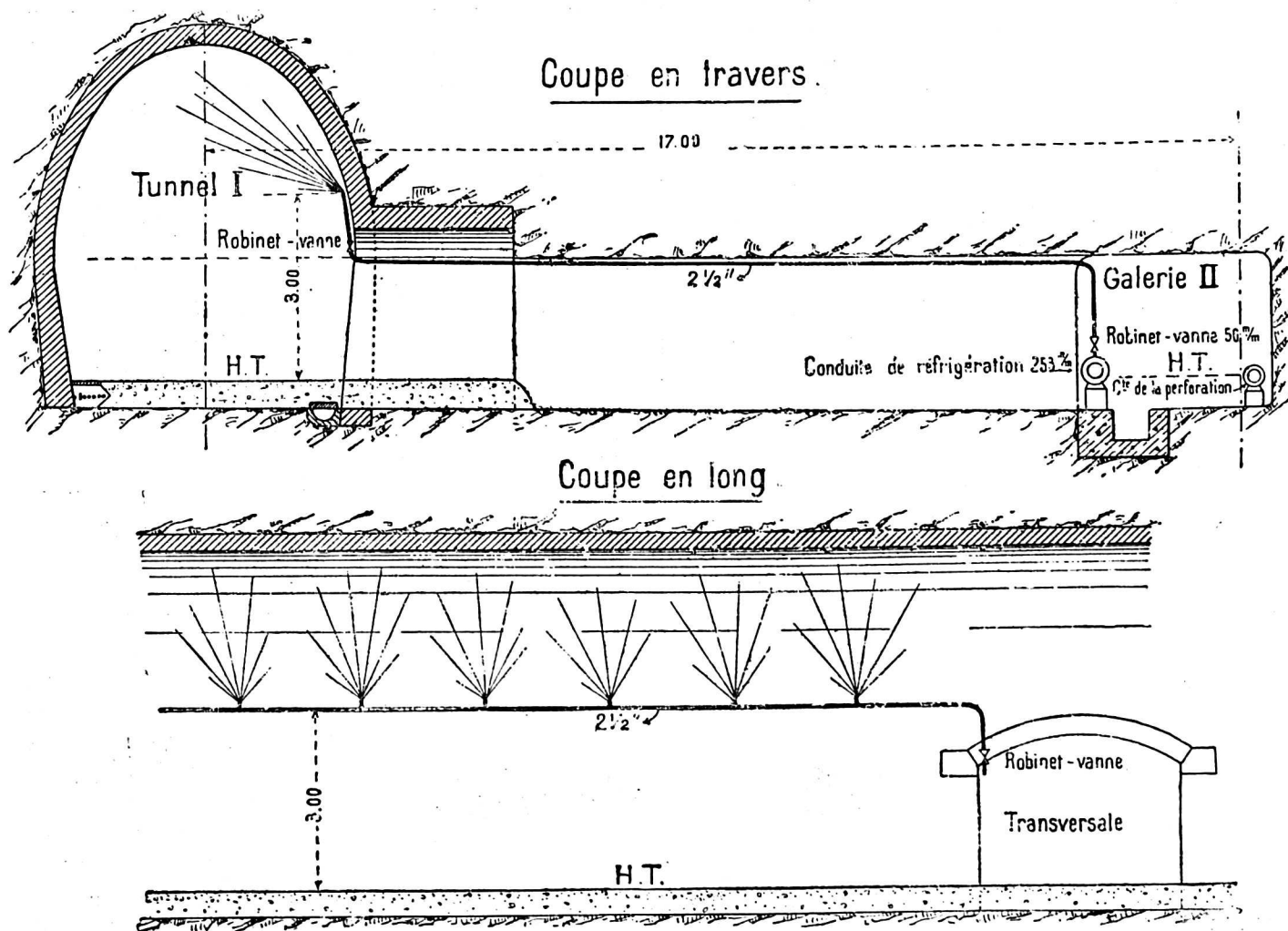


Fig. 52. — Installation de la réfrigération du tunnel par l'eau froide, pendant l'exploitation.

tion. Cette limite a été atteinte au Simplon quand la température du rocher s'est élevée à 38° environ.

Comme moyen auxiliaire de réfrigération, l'eau a été employée, nous l'avons dit, de deux manières différentes, suivant qu'on a voulu *éviter l'échauffement de l'air* ou *refroidir l'air après son échauffement*.

Pour obtenir le premier résultat, on recouvre les parois du rocher d'une mince nappe d'eau lentement renouvelée, qui absorbe la chaleur à sa source et l'emporte. Par ce moyen, l'air circule pour ainsi dire dans un enduit isolant et peut faire un long trajet dans la galerie sans s'échauffer beaucoup. L'appareil qui convient est le tube percé; il n'est pas encombrant, mais assez difficile à régler si l'on tient à ménager l'eau. En le plaçant à la naissance du plafond, on parvient à humecter les parois latérales, une partie du plafond et le sol de la galerie; il exige un long développement de tuyaux, car la surface à mouiller doit être aussi étendue que possible. Ce procédé est très recommandable, car il est plus logique d'éviter l'échauffement de l'air, que de laisser ce dernier se chauffer et de le refroidir ensuite.

Si l'on ne peut faire autrement, on a recours au deuxième procédé, qui consiste à noyer l'air dans de l'eau finement pulvérisée, formant rideau au travers de la galerie. Dans ce cas, on refroidit aussi le rocher, mais sur une faible longueur. Comme il y a intérêt à éviter les brusques changements de température, ces appareils pulvérisateurs doivent être répartis en groupes de force moyenne partageant la galerie en sections de faible longueur.

Ces pulvérisations présentent aussi un avantage des plus appréciables: elles entraînent et fixent la poussière, les miasmes et, en général, les matières nuisibles qui peuvent être en suspension dans l'air.

La pureté de l'air de la galerie de base du tunnel I était notamment des plus remarquable après le grand appareil de pulvérisation placé en avant des chantiers d'abatages.

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, les soins apportés à la ventilation et à la réfrigération des chantiers ont eu une répercussion bienfaisante sur la marche des travaux et l'état sanitaire du personnel. Du côté de Brigue, le rapport médical de M. le Dr Pometta (ouvrage déjà cité) affirme qu'aucun cas d'ankylostomiasis n'a été constaté parmi les ouvriers du tunnel, et quant à l'état sanitaire général, il peut être apprécié par les chiffres suivants tirés de ce rapport: Sur un total général de 3445754 journées faites durant la campagne des travaux, il y a eu en tout 52677 journées de maladie, soit 1.53%. Quant au nombre des morts, il a été au total de 30 par suite d'accident et de 37 par suite de maladie. Du côté d'Iselle, le rapport de M. le Dr Giuseppe Volante¹, médecin de l'Entreprise, dit que l'état sanitaire s'est maintenu toujours bon, que les maladies infectieuses les plus communes n'ont pu s'étendre et que c'est avec un véritable sentiment de satisfaction que, moyennant une rigoureuse vigilance dans l'acceptation des ouvriers sur les chantiers, jointe aux autres précautions hy-

giéniques, on a pu maintenir la galerie du Simplon indemne du terrible fléau de l'ankylostomiasis.

Chaleur souterraine.

En terminant cette notice, qui n'est que le développement d'une conférence que nous avons eu l'honneur de donner à la Société vaudoise des Ingénieurs et des Architectes le 15 décembre 1906, nous ne pouvons nous dispenser de dire quelques mots de la chaleur souterraine exceptionnelle contre laquelle les constructeurs du tunnel du Simplon ont eu à lutter, par les moyens énergiques que nous venons de passer en revue.

Nous avons indiqué, dans un tableau précédent (page 19) les températures du rocher constatées du côté de Brigue; nous complétons ce renseignement, pour la longueur totale du tunnel, par une courbe thermique, réduite à petite échelle (0,5 mm. pour 1° C., fig. 53), dans laquelle le trait plein représente les températures reconnues au moment du percement, tandis que le trait ponctué suit approximativement les prévisions établies par les auteurs qui ont étudié les conditions thermiques dans lesquelles pourraient s'exécuter les projets du grand tunnel de base du Simplon.

On remarque au premier coup d'œil que les différences considérables existant entre la réalité et les prévisions sont localisées en deux zones parfaitement distinctes: l'une s'étendant entre les km. 5 et 11, l'autre entre les km. 14 et 17. Ces différences, de signe contraire, sont dues, selon toute vraisemblance, à une cause accidentelle, qui ne se reproduirait pas dans une montagne à stratification normale et n'infirmant pas, par le fait, la valeur des méthodes employées jusqu'ici pour l'évaluation de la chaleur souterraine. Elles montrent seulement qu'il y a lieu de tenir compte de la présence possible de couches aquifères à l'intérieur des massifs, ce qui implique la connaissance de la constitution géologique de la région intéressée. C'est un élément d'appréciation qu'il sera nécessaire de faire intervenir pour corriger, au besoin, les données fournies par la seule considération de la profondeur des couches et du relief superficiel.

L'abaissement anormal de la température qui s'est produit sur le versant italien a été fort bien expliqué par M. le Dr H. Schardt¹.

Il est dû incontestablement à la circulation d'un cours d'eau souterrain qui s'alimente dans un grand bassin hydrographique superficiel, dont la dépression de Vallé fait partie, suit à l'intérieur du sol une voie que l'allure des couches calcaires et gypseuses du Trias jalonne dans ses grandes lignes et sort du massif quelque part en aval d'Iselle.

Les travaux de percement ayant eu la bonne fortune — au point de vue de l'explication du phénomène — de saigner ce cours d'eau, toute hésitation et toute autre interprétation deviennent impossibles. Le volume d'eau que la perforatrice a détourné de ce torrent varie de 800 à 1200 litres par seconde suivant la saison et sa température, relativement très basse, varie de quelques degrés suivant les sources. Quelques par-

¹ Dott. Giuseppe Volante. *Intorno alle condizioni igieniche e sanitarie in cui si svolsero i lavori della Galleria del Sempione*, 1906.

¹ H. Schardt, Prof. *Les résultats scientifiques du percement du tunnel du Simplon*, 1905.

ties, parmi les plus froides, ayant sans doute pris des raccourcis par les fissures du gneiss, au lieu de suivre les méandres du Trias, entrent dans la galerie à 12°. La température du rocher s'est abaissée elle-même jusqu'à 16°,2, en un point où la normale du milieu devrait être de 35° au moins.

Quant à l'exagération de température constatée du côté suisse, elle a son centre vers les km. 8 et 9. M. le Professeur Schardt a fait un rapprochement entre cette élévation anormale d'une part, la disposition des couches parallèles à la surface, la siccité du terrain et la température superficielle du sol relativement élevée d'autre part, et a pensé que la coïncidence de ces trois derniers facteurs pouvait être la cause de la haute température rencontrée.

Il nous a paru que la coupe géologique du massif du Simplon donnée par M. Schardt pouvait mettre sur la voie d'une autre explication : nous avons donc placé au-dessus de la courbe thermique de la fig. 53 un schéma de cette coupe géologique, en la réduisant à ses plus grandes lignes : *G* représentant les différents gneiss et schistes cristallins, *T* les calcaires, dolomies, gypse, anhydrite, etc., du Trias, et *S* les schistes jurassiques. Les couches *T*, éminemment attaquables par les eaux, livrent passage à celles-ci à l'intérieur de la montagne. Or, il est impossible de ne pas re-

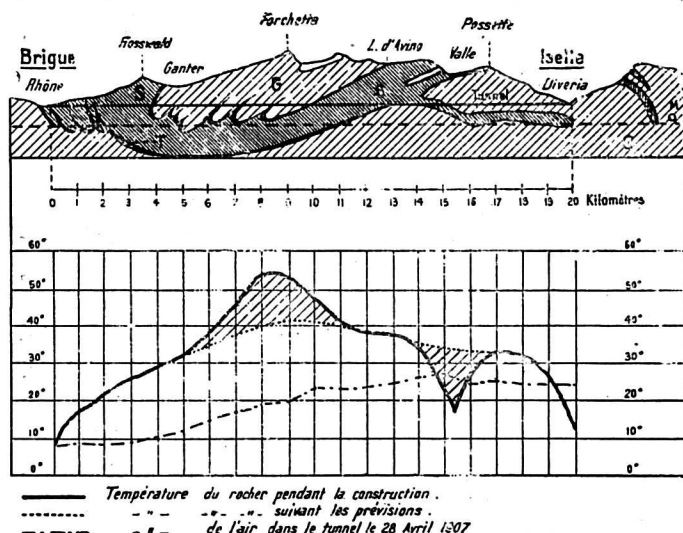


Fig. 53. — Profil géologique schématique du massif du Simplon, d'après la coupe de M. H. Schardt, et courbes de températures.

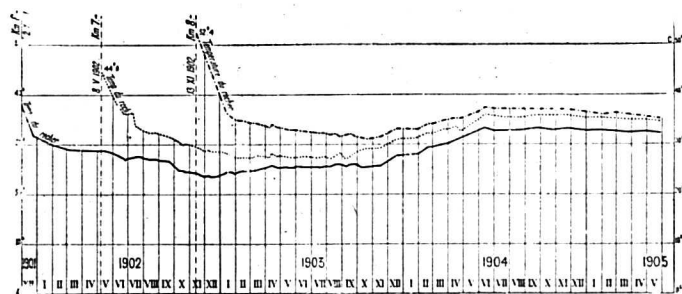


Fig. 54. — Refroidissement progressif du rocher dans la galerie parallèle et son réchauffement à la suite du passage dans cette galerie des eaux chaudes de l'avancement.

marquer la correspondance qui existe entre la zone à température exagérée et celle où les couches triasiques aquifères du massif de recouvrement s'enfoncent par une série de plis à une grande profondeur au-dessous du tunnel. L'eau de surface, qui a pénétré jusque dans ce bas-fonds et qui tend à corroder toujours plus les calcaires et à s'y frayer des passages toujours plus nombreux a pu trouver quelque issue superficielle (il y a des sources chaudes au bord du Rhône dans le voisinage de Brigue). On peut donc concevoir qu'une circulation lente se produit dans cette nappe aquifère et que, sous une forte pression hydrostatique, l'eau monte jusqu'aux sommets des anticlinaux successifs de calcaires du Trias, après avoir passé par les parties profondes de ces mêmes couches. En circulant lentement dans ces cavités tortueuses, que M. Schardt fait passer à plus de 500 m. au-dessous du tunnel, l'eau se réchauffe, puis elle véhicule cette chaleur d'emprunt dans un milieu plus élevé et plus froid, qu'elle réchauffe à son tour. Autrement dit, la présence d'un réseau aquifère extrêmement plissé produirait, dans cette partie de la montagne, une sorte d'égalisation de la température du rocher, ce qui ne peut avoir lieu que par un réchauffement des couches supérieures. Nous ajouterons que la circulation de l'eau servant de véhicule à la chaleur n'implique même pas la nécessité de l'issue superficielle que nous avons supposée.

C'est entre les km. 8 et 9 que le tunnel se serait rapproché le plus des canaux souterrains d'eau chaude. Il en a coupé quelques ramifications vers le km. 8,500, ayant une température de 54°, et d'autres plus abondantes et moins chaudes (45° à 49°) entre les km. 9,500 et 10,500.

Le fait qu'on a constaté une température moyenne superficielle du sol du côté Suisse légèrement supérieure à la température ordinaire¹ serait une répercussion lointaine de ce réchauffement anormal.

Les deux anomalies, de signe contraire, qui affectent la courbe thermique seraient donc, à notre sens, une conséquence de la tectonique toute particulière de ce massif, que la science du Dr Schardt a su mettre en lumière, avant qu'elle ne fut définitivement démontrée par la découverte des schistes calcaires, dans la partie centrale du tunnel.

Une présomption favorable à notre explication peut être tirée de la permanence des grandes sources chaudes qui débouchent dans le tunnel et dont la température ne s'est pas abaissée jusqu'à ce jour.

Un autre fait intéressant, et qui ne peut qu'étayer aussi notre manière de voir, s'est produit dans la galerie parallèle du côté de Brigue pendant qu'on y a déversé les eaux chaudes provenant précisément des sources auxquelles nous faisons allusion. Ce déversement a commencé en novembre 1903 et à partir de cette époque on constate un réchauffement progressif du rocher avoisinant la galerie parallèle, réchauffement qui atteint jusqu'à 8° C. aux kilo-

¹ Cette température superficielle a été constatée par une série de thermomètres spéciaux placés sur la montagne, le long du profil du tunnel, enfoncés à 1 m. de profondeur dans le sol. Ces thermomètres ont été lus régulièrement pendant toute la durée des travaux.

mètres 6, 7 et 8 de la dite galerie¹. L'eau déversée avait un volume de 200 litres à la seconde au maximum et une température variant de 38° à 36° entre les kilomètres 8 et 6 en juin 1904.

La figure 54 montre cette particularité, très suggestive au point de vue de l'explication du réchauffement de la roche par la circulation des eaux chaudes. Elle fait voir

aussi le refroidissement graduel du rocher, tel qu'il se produisait, sous l'influence de la ventilation, avant qu'intervienne la cause perturbatrice dont nous venons de parler.

¹ Aux km. 6, 7 et 8 de la galerie parallèle, la température du rocher a été observée au moyen de thermomètres isolés, placés dans des trous de mines de 1^m,50 de profondeur percés perpendiculairement à la paroi verticale située du côté opposé au collecteur des eaux.

Principales publications parues sur le Simplon pendant la construction du tunnel ou depuis son achèvement :

Rapports trimestriels au Conseil fédéral suisse sur l'état des travaux du percement du Simplon, par M. J. Dumur, directeur des Chemins de fer J.-S., et M. E. Colomb, directeur des C. F. F.

Le tunnel du Simplon, par Pierre de Blonay (*Bulletin technique de la Suisse romande*, années 27 à 32).

Sulle condizioni igieniche e sanitarie dei lavori al traforo del Sempione, par L. Pagliani (Istituto d'igiene della R. università di Torino). 1900.

Le tunnel du Simplon, par A. Dumas (*Le Génie civil*). Paris, 1900.

Spec. Berichte der Direktion der J.-S. an das Schw. Eisenbahndep. über den Bau des Simplon-Tunnels. **Die Bestimmung der Richtung, der Länge und der Höhenverhältnisse**, par M. Rosenmund. 1901.

Der Bau des Simplontunnels, par P. Möller (*Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*). Berlin, 1902 et 1904.

Visite aux travaux du Simplon (Congrès de la Houille blanche. Compte rendu, vol. 2. 1902).

Note sur le profil et la tectonique du massif du Simplon, suivie d'un rapport supplémentaire sur les venues d'eau dans le tunnel du Simplon du côté d'Iselle, par H. Schardt. 1903.

Le tunnel du Simplon, par G. de Fooz (*Mém. de l'Union des ingénieurs de Louvain*). 1904.

Comitato italiano del valico ferroviario del Sempione. Relazione finale, par Guilberto Borromeo e E. Mola. 1904.

Die Bauarbeiten am Simplon-Tunnel, par S. Pestalozzi (*Schw. Bauzeitung*, Band XXXVIII et XXXIX). 1904.

Les résultats scientifiques du percement du tunnel du Simplon. Géologie, hydrologie, thermique, par H. Schardt (*Bulletin technique de la Suisse romande*). 1905.

Rapport sur les travaux du Simplon, par M. Jaquier, ingénieur en chef des P. et C. (*Ann. des P. et Ch.*, 4^e trim.). 1905.

Anhydrit-Kristalle aus dem Simplon-Tunnel, par H. Preiswerk (*N. Jahrbuch für Min., Geol. und Paleont.*). 1905.

Die Bauarbeiten am Simplon-Tunnel, par K. Pressel (*Schw. Bauzeitung*, Band XLVII). 1906.

Sanitäre Einrichtungen und ärztliche Erfahrungen beim Bau des Simplon-Tunnels, Nord-Seite. Dr D. Pometta.

Intorno alle condizioni igieniche e sanitarie in cui si svolsero i lavori della galleria del Sempione. Dott. Giuseppe Volante. 1906.

Le percement du Simplon, par F. Bonjour, Lausanne. 1906.

Le Simplon. Texte de l'Album officiel, par Paul Zutter. Lausanne, 1906.

Il traforo del Sempione ei passaggi alpini, par A. Ferrucci. 1906.

Les installations électriques pour l'exploitation et l'éclairage dans le grand tunnel du Simplon, par E. Rod (*Bulletin technique de la Suisse romande*). 1907.

